

Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkkyyys.

Kokeellinen tutkimusosuus



Antti Nurmikolu



RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN

Ratahallintokeskuksen
julkaisu A 9/2006

Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden
hienoneminen ja routimisherkyys.
Kokeellinen tutkimusosuus

Antti Nurmikolu

Helsinki 2006

Ratahallintokeskus

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006

ISBN 952-445-159-x (nid.)

ISBN 952-445-160-3 (pdf)

ISSN 1455-2604

Julkaisu pdf-muodossa: www.rhk.fi

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Antti Nurmikolu

Helsinki 2006

Nurmikolu Antti: Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkkyyys. Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2006. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. 170 sivua ja 6 liitettä. ISBN 952-445-159-x, ISBN 952-445-160-3 (pdf), ISSN 1455-2604.

Avainsanat: kalliomurske, ratarakenne, hienoneminen, hienoaines, routimisherkkyyys, toistokuormituskoe, routanousukoe, raidesepeli, alusrakenne, rapautuminen, eristyskerros, välikerros, karkearakeinen materiaali, huokoskokojakautuma, vedenimu

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus käsittelee murskatun kalliokiviaineksen hienonemista radan rakennekerroksissa sekä hienonemiseen ja hienontuneen kiviaineksen routimisherkkyyteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimus perustuu radan tukikerroksessa hienontuneille raidesepelinäytteille, uusille kalliomurskeille sekä joillekin luonnollisille karkearakeisille maalajeille tehtyihin laboratoriotutkimuksiin. Työ sisältää aiemmin julkaistua kirjallisuusselvitystä (Nurmikolu, 2004) täydentävät kokeelliset tutkimukset.

Raidesepelin hienonemista arvioidaan työssä pääosin tukikerrosnäytteitä analysoimalla. Rakeisuuden ohella tarkasteltuja ominaisuuksia ovat karkeiden partikkelien lujuus, veden absorptio ja jäädytys-sulatuskestävyys sekä hienoaineksen veden adsorptio, ominaispinta-ala, huokoskokojakautuma, mineralogia ja humuspitoisuus. Havaintojen perusteella raidesepelin hienoneminen Suomen rataverkolla on suurelta osin seurausta sepelirakeiden mekaanisesta murtumisesta ja hioutumisesta liikennekuormituksen ja tukemisen vaikutuksesta. Raidesepelinäytteiden kemiallinen rapautuminen havaittiin yleensä merkityksettömän vähäiseksi ja esiintyessäänkin suurelta osin rakeiden pinnoille rajoittuneeksi.

Pitkäaikaisten käyttökokemusten puuttuessa tutkimuksessa on pyritty ennakoimaan erityisesti *eristys- ja välikerros*murskeiden hienonemista liikennekuormituksen simuloimiseksi kehitetyssä kolmen erillisen kuormituslevyn toistokuormituslaitteistossa. Testattavan materiaalin rajapintoihin liittyvistä koeteknisistä rajoitteista huolimatta hienonemiseen vaikuttavia tekijöitä on pystytty havainnoimaan ja hienonemisen voimakkuutta ratarakenteen kuormitusolosuhteissa arvioimaan.

Kiviainesten routimisherkkyyttä tarkastellaan kehitetyllä routanousukoejärjestelyllä. Tietyssä kalliomurskeessa routimisherkkyyys todetaan tarkastelluilla alle 15 % hienoainespitoisuuksilla suoraan verrannolliseksi sisältämäänsä hienoainespitoisuuteen. Eri kiviainesten yhteistarkastelussa tehtävän askeltavan regressioanalyysin tuloksena esitetään alle 0.002 mm aineksen osuuteen, karkeiden partikkelien vedenimuun ja hienoaineksen kokonaishuokostilavuuteen perustuva regressiomalli, joka selittää routimisherkkyyttä kiviainesten yhteistarkastelussa miltei yhtä hyvin kuin hienoaineksen määrä yksittäisten kiviainesten erillistarkasteluissa.

Tutkimusten käytännöllisenä tuloksena esitetään suositukset eristys- ja välikerroksissa käytettävän kalliomurskeen lujuudelle, mineralogialle ja rakeisuudelle.

Nurmikolu Antti: Pulverisering av stenkross som används i bankonstruktioner samt stenkrossets benägenhet för tjälbildning. Den experimentella undersökningsdelen. Banförvaltningscentralen, Bannätsavdelningen. Helsingfors 2006. Banförvaltningscentralens publikationer A 9/2006. 170 sidor och 6 bilagor. ISBN 952-445-445-159-x, ISBN 952-445-160-3 (pdf), ISSN 1455-2604.

Nyckelord: bergkross, bankonstruktion, pulverisering, finmaterial, tjälfarlighet, upprepat belastningsprov, tjällyftningsprov, spårakadam, ballast, underballast, underbyggnad, förvittring, isolerskikt, mellanskikt, grovkornigt material, porstorleksfördelning, vattenabsorption.

SAMMANDRAG

I den här studien undersöks hur krossat bergstensmaterial pulveriseras i banans konstruktionsskikt samt vilka faktorer som påverkar pulveriseringen och det pulveriserade stenmaterialets tjälfarlighet. Undersökningen grundar sig på laboratorieprov av pulveriserad spårakadam i banans ballast, på nya bergkross samt på laboratorieundersökningar av några naturliga grovkorniga jordarter. I studien ingår experimentella undersökningar som kompletterar en tidigare publicerad litteraturutredning (Nurmikolu, 2004).

Pulveriseringen av *spårakadam i ballast* uppskattas i studien huvudsakligen genom analys av ballastprover. Vid sidan av graderingen undersöktes grova partiklars hållfasthet, vattenabsorption och tillfrysnings- smältningsmotstånd samt vattenabsorption av finmaterial, den specifika ytan, porstorleksfördelningen, mineralogi och humushalt. Man kom fram till att spårakadamens pulverisering på det finska bannätet till största delen beror på mekaniskt sönderfall och nötning till följd av trafikbelastning och stoppning. En kemisk förvittring av spårakadamproverna ansågs i allmänhet obetydlig, och när sådant uppträdde var det till största delen begränsat till kornens yta.

I brist på långvariga driftserfarenheter har man i undersökningen eftersträvat att förutse speciellt pulveriseringen av *kross i isoler- och mellanskikten* i en anläggning för upprepad belastning bestående av tre separata belastningsskivor som utvecklats för simulering av trafikbelastningen. Trots de provtekniska begränsningarna i anslutning till det testade materialets gränssnitt, har man kunnat märka faktorer som påverkar pulveriseringen samt uppskattat pulveriseringens styrka i bankonstruktionens belastningsförhållanden.

Stenmaterialens tjälfarlighet undersöks genom ett arrangemang som utvecklats för tjällyftningsprov. I vissa bergkross fastställs att tjälfarlighet på halter understigande 15 % finmaterial är direkt jämförbar med bergkrossens halt av finmaterial. Som resultat av en stegvis regressionsanalys i samband med samstudien av olika stenmaterial, framförs en regressionsmall för tjälfarligheten som grundas sig på en andel understigande 0,002 mm av materialet, grova partiklars vattenabsorption och finmaterialets helhetsvolym av porer. Denna regressionsmodell förklarar tjälfarligheten vid samstudien av stenmaterial nästan lika bra som finmaterialets mängd vid separata studier av enskilda stenmaterial.

Som praktiskt resultat av undersökningarna framförs rekommendationer för hållfastheten, mineralogin och graderingen av bergkross som används i isoler- och mellanskikt.

Nurmikolu Antti: Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in track structure. Experimental part of the study. Finnish Rail Administration, Rail Network Department. Helsinki 2006. Publications of the Finnish Rail Administration A 9/2006. 170 pages and 6 appendices. ISBN 952-445-445-159-x, ISBN 952-445-160-3 (pdf), ISSN 1455-2604.

Key words: crushed rock aggregate, track structure, degradation, fines, frost susceptibility, cyclic loading test, frost heave test, ballast, subballast, weathering, substructure, frost protection layer, coarse-grained material, pore size distribution, water absorption

SUMMARY

This study deals with the degradation of crushed rock aggregate in the structural layers of track as well as the factors influencing degradation and frost susceptibility of degraded aggregate. The research is based on laboratory analyses of degraded ballast samples from the ballast bed, new crushed rock aggregates and some natural coarse-grained soils. The study is an experimental follow-up to the literature review (Nurmikolu, 2004) published earlier.

In the research the degradation of *ballast* is assessed primarily by analysing samples from the ballast bed. Other examined properties besides grading are strength, water absorption and freeze-thaw resistance of coarse particles and water adsorption, specific surface area, pore size distribution, mineralogy and loss on ignition of fines. Based on observations the degradation of ballast in the Finnish railway network is largely due to mechanical breakage and abrasion of ballast grains from traffic loading and tamping. Chemical weathering of ballast samples proved generally insignificantly small, and where it occurred, it was limited to the surfaces of grains.

In the absence of long-term use experiences, the research strived to forecast especially the degradation of the *frost protection and intermediate layer crushed rock aggregates* in cyclic loading apparatus with three separate loading plates developed to simulate traffic loading. Despite the test technical limitations related to the test material interfaces, the factors affecting degradation could be observed and the magnitude of degradation under the loading conditions of the track structure assessed.

The frost susceptibility of aggregates was examined by the developed frost heave test arrangements. In certain crushed rock aggregate the frost susceptibility at under 15 % fines content was found to be directly proportional to the fines content of the material. As the result of a stepwise regression analysis performed to analyse various aggregates together a regression model based on the under 0.002 mm material content, water absorption of coarse particles and total pore volume of fines is presented. In this combined analysis of aggregates it was possible to explain frost susceptibility nearly as well as by fines content in the analysis of individual aggregates.

The practical results of the research include recommendations for the strength, mineralogy and grading of the crushed rock aggregate in the frost protection and intermediate layers of track structure.

ESIPUHE

Tämä raportti on kalliomurskeiden käyttöä ratarakenteessa tarkastelleen tutkimushankkeen jälkimmäinen, kokeellisen tutkimusosuuden sisältävä osa. Kokeellinen tutkimussuunnitelma laadittiin aiemmin julkaistun kirjallisuusselvityksen (Nurmikolu, 2004) perusteella. Tutkimus tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden laitoksella professori Pauli Kolisojan ohjauksessa. Raportin laati tekniikan tohtori Antti Nurmikolu.

Tutkimuksen tilaajana ja päärahoittajana toimi Ratahallintokeskus, jonka edustajana työtä ohjasi Teknisen yksikön päällikkö Matti Levomäki. Tutkimusta rahoitti osittain myös Suomen Akatemia (rahoituspäätös nro 73664).

Helsingissä lokakuussa 2006

Ratahallintokeskus
Rataverkko-osasto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SUMMARY	5
ESIPUHE.....	6
1 JOHDANTO	10
1.1 Tausta	10
1.2 Tavoitteet.....	10
1.3 Tutkimuksen sisältö ja työn rakenne	11
2 TUTKIMUSMATERIAALIT.....	12
2.1 Tutkimusmateriaalien tarve	12
2.2 Raidesepelit radan tukikerroksista.....	12
2.3 Vertailunäytteet luonnollisista maalajeista ja erotellut mineraalit	16
2.4 Uudet kalliomurskeet.....	17
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	18
3.1 Tutkimukset tukikerroksnäytteiden karkearakeisille partikkeleille.....	18
3.1.1 Raekokojakautuma – seulonta.....	18
3.1.2 Vedenimu ja kiintotiheys.....	18
3.1.3 Jäädytys-sulatuskäyttäytyminen	19
3.1.4 Petrografinen tarkastelu ja kiviaineksen lujuus.....	19
3.2 Tutkimukset tukikerroksnäytteiden hienoaineksille	20
3.2.1 Raekokojakautuma – areometri ja sedigraph	20
3.2.2 Mineralogia – röntgendiffraktio	20
3.2.3 Ominaispinta-ala – typpiadsorptio	20
3.2.4 Veden adsorptio.....	20
3.2.5 Huokoskokojakautuma – elohopeaporosimetri	21
3.2.6 Humuspitoisuus – polttomenetelmä	21
3.2.7 Pintarakenne – pyyhkäisyelektronimikroskooppi	21
3.3 Routanousukokeet.....	22
3.3.1 Koeohjelman pääperiaatteet	22
3.3.2 Näytteen valmistus	23
3.3.3 Koejärjestelyt.....	26
3.4 Toistokuormituskokeet kiviaineksen hienonemistarkasteluissa.....	28
3.4.1 Junakuormitusta simuloiva toistokuormituslaitteisto.....	28
3.4.2 Hienonemisen tarkkailu ja siirtymämittaukset	36
3.4.3 Tutkimukset toistokuormituskokeiden materiaaleille	39
4 TUKIKERROSNÄYTTEET JA NIIDEN HIENOAINES	41
4.1 Yleistä.....	41
4.2 Rakeisuus.....	41
4.2.1 Raekokojakautuma ja hienorakeisen aineksen määrä tukikerroksessa ...	41
4.2.2 Tukikerroksen toimintakunnon arviointi rakeisuustutkimuksen perusteella.....	46
4.3 Karkeiden kiviainespartikkelien fysikaaliset ominaisuudet.....	52
4.3.1 Lujuus-, raemuoto ja petrografia	52
4.3.2 Veden imeytyminen	55
4.3.3 Jäädytys-sulatuskäyttäytyminen	59
4.3.4 Kiintotiheys	61

4.4	Hienoainesten fysikaaliset ominaisuudet	62
4.4.1	Mineralogia	62
4.4.2	Orgaaninen aines ja rautasaostumat	68
4.4.3	Ominaispinta-ala ja vesihöyryn adsorptio	69
4.4.4	Huokoskokojakautuma ja pintarakenne	78
5	ROUTANOUSUKOKEET	86
5.1	Tulosten yleistarkastelu	86
5.1.1	Tehdyt kokeet ja tulosten analysointi	86
5.1.2	Tulosten tulkinta ja routimisherkkyyttä kuvaavat parametrit	86
5.1.3	Tulosparametrien virherajojen arviointi	90
5.1.4	Routimisherkkyyssparametrien keskinäiset korrelaatiot ja routivuusluokitus	93
5.2	Hienoainesmäärän vaikutus routimisherkkyyteen	96
5.2.1	Kiviaineskohtainen tarkastelu	96
5.2.2	Uusien kalliomurskeiden yhteistarkastelu	98
5.2.3	Uusien kalliomurskeiden ja tukikerrosnäytteiden yhteistarkastelu	101
5.2.4	Kalliomurskeiden ja luonnollisten maalajien yhteistarkastelu	104
5.3	Muun rakeisuuden vaikutus routimisherkkyyteen	107
5.4	Kiviainespartikkelien laadun vaikutus routimisherkkyyteen	107
5.4.1	Poikkeamat hienoainesmäärien perusteella ennustetuista routivuuksista	107
5.4.2	Hienoaineoksen hehkutushäviö, veden adsorptio ja ominaispinta-ala	110
5.4.3	Hienoaineoksen huokoisuus	114
5.4.4	Karkean aineksen vedenimu	115
5.4.5	Kiviainespartikkelien laadun huomioiva routimisherkkyyssmalli	117
6	SYKLISET TOISTOKUORMITUSKOKEET	119
6.1	Tulosten yleistarkastelu	119
6.1.1	Tehdyt kokeet	119
6.1.2	Vertailuparametrit	125
6.1.3	Yleisiä siirtymämittaushavaintoja	126
6.2	Koetekniset havainnot	131
6.2.1	Hienonemisen taustalla olevat tapahtumat ja verkkokankaan vaikutus	131
6.2.2	Peltilevy pohjakumin päällä	134
6.2.3	Kuormituslevyjen sitomiskäsit	135
6.2.4	Laatikon reuna-alueet	136
6.2.5	Hienoneminen tärytystiivistyksessä	137
6.3	Pohjan joustavuuden ja kuormitustason vaikutus	137
6.4	Raekokojakautuman vaikutus	139
6.5	Veden ja hienorakeisen aineksen vaikutus	142
6.5.1	Erikseen	142
6.5.2	Yhdessä	142
6.6	Kiviaineslaadun vaikutus	145
6.7	Raidesepelin tukemisen vaikutus	151
7	YHTEENVETO TULOKSISTA JA MATERIAALISUOSITUKSET	154
7.1	Tukikerrosnäytteet	154
7.2	Routanousukokeet	158
7.3	Toistokuormituskokeet	160

8	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET	164
8.1	Primaariset päätelmät	164
8.1.1	Kalliomurskeiden hienoneminen.....	164
8.1.2	Routimisherkkyyden arviointi	164
8.2	Yksityiskohtaiset päätelmät	165
8.2.1	Tukikerrosnäytteiden ja routimisherkkyyden tarkastelu	165
8.2.2	Toistokuormituskokeet	166
8.3	Jatkotutkimussuositukseset	166
	LÄHDELUETTELO	168

LIITTEET

Liite 1	Raidesepelinäytteiden ja vertailumateriaalien rakeisuuskäyrät
Liite 2	Rapautuneiden raidesepelinäytteiden ohuthietutkimukset
Liite 3	Toistokuormituskokeet: kiviainesten lujuus-, muoto- ja ohuthietutkimukset
Liite 4	Toistokuormituskokeet: rakeisuustiedot
Liite 5	Routanousukokeet: koe- ja tulostiedot
Liite 6	Routanousukokeet: näytteiden rakeisuuskäyrät

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Radan liikennöitävyyttä rajoittavat raidegeometrian pystysuuntaiset poikkeamat voivat olla seurausta tukikerroksen, alusrakenteen tai pohjamaan pysyvien muodonmuutosten aiheuttamasta raiteen painumisesta sekä routimisilmiön vaikutuksesta tapahtuvista routanousuista. Ratarakenteen routasuojauksen lähtökohtana on, että rakennekerrokset rakennetaan *routimattomista* kiviaineksista.

Karkearakeista murskattua kalliokiviainesta, raidesepeliä, käytetään raiteen *tukikerroksessa*. Tukikerroksen kuormitusympäristöä havainnollistaa Simon et al. (1983) toteamus, jonka mukaan nimenomaan raidesepeli joutuu kohtaamaan jännitystasoilla ja ympäristökuormituksella mitattuna kaikkein ankarimmat rasitukset rakentamisessa käytettävistä kiviaineksista. Tästä syystä ei ole yllättävää, että kuormitusympäristön aiheuttama kiviaineksen hienoneminen on tukikerroksen kestoian määräävä tekijä. Aiemmassa tutkimuksessa (Nurmikolu, 2000; Nurmikolu et al., 2000) on arvioitu kenttä- ja laboratoriotutkimuksiin nojautuen kiviaineksen lujuuden vaikutusta raidesepelin kestoikään. Aihealueesta tehdyssä kirjallisuusselvityksessä (Nurmikolu, 2004) kuitenkin todettiin, että tutkimustieto raidesepelin hienonemismekanismista Suomen olosuhteissa ja syntyvän hienoaineksen vaikutuksesta tukikerroksen toimintaan on niukkaa.

Käytettävissä olevien sora- ja hiekkavarojen vähenemisen myötä murskatun kalliokiviaineksen käyttö on Suomessa parhaillaan laajentunut myös *tukikerroksen alapuolisiin rakennekerroksiin*. Esimerkiksi kaksiraiteisen 74 kilometrin pituisen Kerava–Lahti-oikoradan, samoin kuin Vuosaaren satamaradan, alusrakennekerrokset rakennetaan käytännössä kokonaisuudessaan murskatusta kalliokiviaineksesta. Alusrakenteelta edellytetään sadan vuoden käyttöikää, jolloin siihen kohdistuva niin liikenne- kuin ympäristörasituskin ovat oleellisesti pitkäkestoisempia verrattuna yleensä alle 40 vuoden käyttöiän tukikerrokseen. Lisäksi raidesepeliä hienorakeisempi raekokojakautuma altistaa eristys- ja välikerroskiviainekset suuremmasta raepinta-alasta johtuen raidesepeliä voimakkaammalle ympäristörasitusten aiheuttamalle hienonemiselle. Alusrakenteen mahdollisesti routivaksi muuttavaa hienontunutta kiviainesta ei voida myöskään seulontakoneella puhdistaa toisin kuin tukikerroksesta, joten mahdollisten virheellisten materiaalivalintojen seuraukset voivat olla dramaattisia. Käyttökokemusten ja tutkimustiedon puuttuessa kalliomurskeen pitkäaikaistoimivuuden, erityisesti kiviaineksen hienonemisen, arviointi radan alusrakenteen kuormitusympäristössä on siten ollut merkittävältä osin vailla vertailupohjaa.

1.2 Tavoitteet

Tutkimushankkeen päätavoitteina on ollut lisätä tietämystä raidesepelin hienonemisprosessissa vaikuttavista tekijöistä, selvittää kalliomurskeiden sisältämän ja niihin todellisessa tukikerroksen kuormitusympäristössä kerääntyvän hienoaineksen ominaisuuksia ja erityisesti niiden vaikutusta kiviainesten routimisherkkyyteen, kehittää liikennekuormitusta simuloiva koejärjestely ja arvioida sen avulla eristys- ja välikerroksissa pitkällä aikavälillä tapahtuvaa kalliomurskeen hienonemista ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Pyrkimyksenä oli, että saavutettavien tulosten avulla voitaisiin ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden laadun valinnassa ottaa jatkossa huomioon entistä enemmän elinkaaritalouteen pohjautuvia näkökohtia.

1.3 Tutkimuksen sisältö ja työn rakenne

Tutkimuskokonaisuuteen kuuluvassa kirjallisuustutkimuksessa (Nurmikolu, 2004) tehtyjen havaintojen perusteella määriteltiin tarkoituksenmukaisin sisältö tutkimuksen kokeelliselle osuudelle. Radan rakennekerrosten kalliomurskeiden hienonemisprosessissa vaikuttavien tekijöiden ja kiviaineksiin kerääntyvän hienoaineksen ominaisuuksien arvioimiseksi kerättiin näytteitä todellisessa kuormitusympäristössä hienontuneista raidesepeleistä. Tutkimusmateriaalit ja niiden valinta on kuvattu luvussa 2. Näytteitä tarkasteltiin useissa laboratoriokokeissa, joista keskeisessä osassa olivat tarkoitusta varten kehitetyllä laitteistolla tehdyt routanousukokeet. Routanousukoejärjestely on esitelty luvussa 3 samoin kuin liikennekuormituksen aiheuttaman hienonemisen ennakoimiseksi erityisesti eristys- ja välikerrosmurskeita varten kehitetty laboratoriomittakaavainen toistokuormitusjärjestely.

Luvussa 4 käsitellään tukikerroksesta otetuille hienontuneille raidesepelinäytteille tehtyjen laboratoriotutkimusten tulokset sekä niistä tehdyt päätelmät kiviaineksen hienonemismekanismista ja hienoainesten laadusta. Tukikerrosnäytteiden ominaisuuksia verrataan käyttämättömien kalliomurskeiden sekä muutamien sora- ja hiekka-materiaalien tuloksiin. Tarkastelu jatkuu routanousukokeiden tulosten esittelyllä ja routimisherkkyyteen vaikuttavien tekijöiden tilastollisella analyysillä luvussa 5.

Toistokuormituskokeiden tulokset ja niistä tehdyt päätelmät on esitetty luvussa 6. Koetuloksista analysoidaan eri tekijöiden merkitystä ensi sijassa kiviainesten hienonemiseen, mutta myös palautuviin ja pysyviin muodonmuutoksiin.

Luvussa 7 on esitetty yhteenveto saavutetuista tuloksista ja tutkimuksiin pohjautuvat materiaalisuositukset radan eristys- ja välikerroksissa käytettäville kalliomurskeille. Työn lopuksi luvussa 8 on raportoitu tutkimuksista tehdyt päätelmät sekä suositukset jatkotutkimusaiheista.

2 TUTKIMUSMATERIAALIT

2.1 Tutkimusmateriaalien tarve

Tutkimus koostui kolmesta toisiinsa nivoutuvasta osakokonaisuudesta. Koska kalliomursketta ei ole Suomessa aiemmin käytetty eristys- ja välikerrosten materiaalina, todellisissa kenttäolosuhteissa pitkällä aikavälillä tapahtuvaa kalliokiviaineksen hienonemisesta on mahdollista tarkastella vain raidesepelin osalta. Tähän tarkoitukseen kerättiin eri puolilta rataverkkoa näytteitä hienontuneista raidesepeleistä (vrt. luku 2.2), joiden ominaisuuksia tutkittiin laboratoriokokeissa erityisesti hienoaineksen, mutta myös karkeamman kiviaineksen osalta.

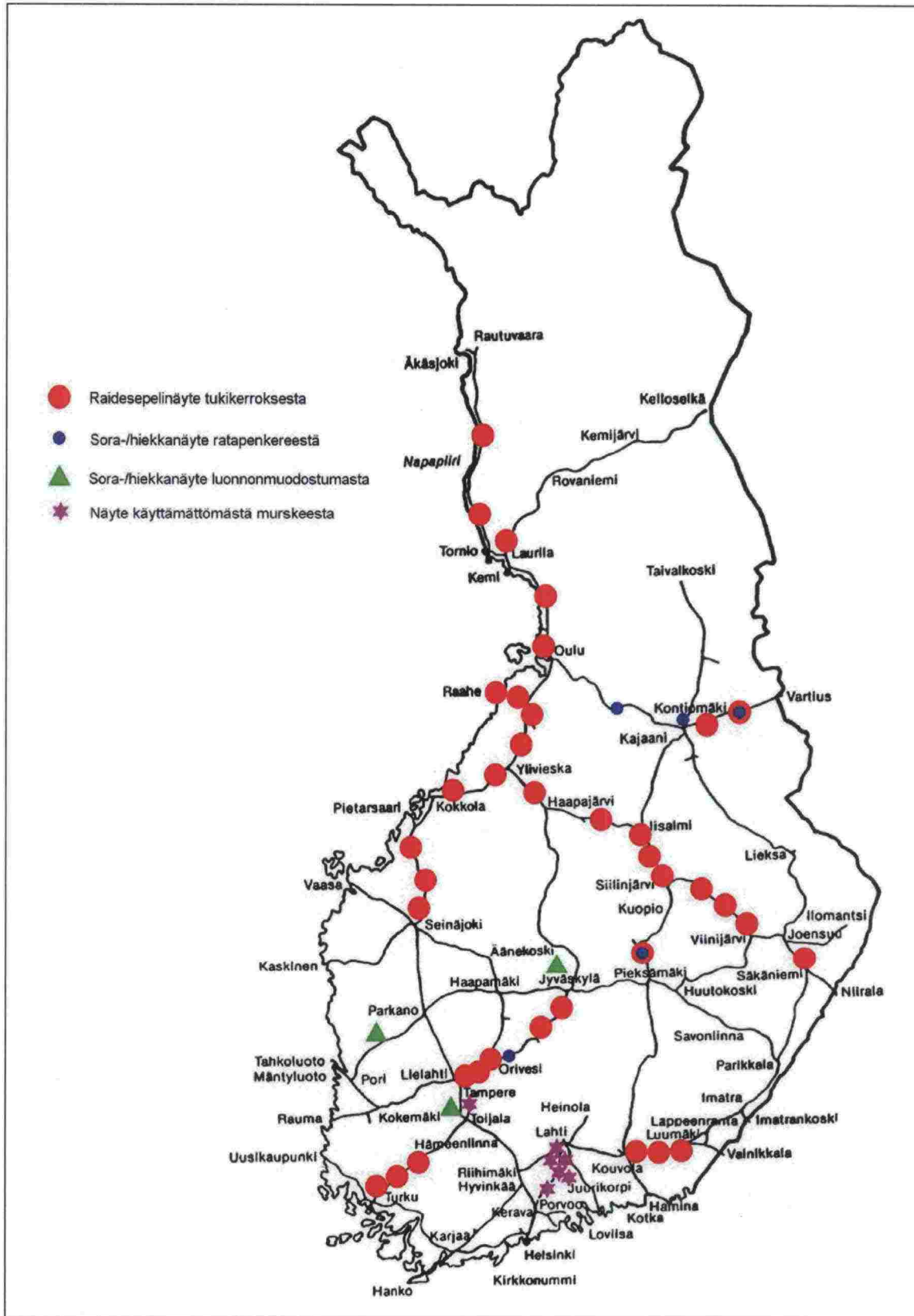
Eristys- ja välikerrosmurskeiden hienonemisen ennakoinniseksi ainoa kustannuksiltaan kyseeseen tuleva vaihtoehto todettiin olevan laboratoriomittakaavaisen junakuormitusta simuloivan toistokuormitusjärjestelyn kehittäminen tutkimuksen toisena osakokonaisuutena. Kyseisellä laitteistolla tehdyissä koesarjoissa tutkittiin kiviainesten hienonemiseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimusmateriaaleina käytettiin uusia kalliomurskeita (vrt. luku 2.4).

Kolmantena tutkimusosiona tarkasteltiin eristys- ja välikerrosmurskeiden kestoiän kannalta määrääväksi tekijäksi arvioitua kalliomurskeiden routimisherkkyyttä tätä tarkoitusta varten kehitetyn routanousukoelaitteiston avulla. Routimisherkkyyttä tutkittiin käyttämättömistä kalliomurskeista, radan tukikerroksissa hienontuneista raidesepeleistä sekä joistakin luonnon lajittelemista sora- ja hiekkamateriaaleista (vrt. luku 2.3).

2.2 Raidesepelit radan tukikerroksista

Raidesepelinäytteitä otettiin eri puolilta rataverkkoa pääosin pitkään liikenteen alaisina olleista tukikerroksista. Näytteille tehtyjen laboratoriotutkimusten avulla pyrittiin selvittämään hienontumistapaa, hienontumisen määrää sekä erityisesti syntyneen hienoaineksen laatua ja sen vaihteluja tukikerroksessa tyypillisesti käytetyillä kiviaineksilla. Keskeisessä osassa oli lisäksi näytteille tehtyt routanousukokeet.

Näytteenotto keskitettiin kohteisiin, joissa raidesepeli oli ollut pitkään radassa puhdistamatta ja osuuksille, joissa raidesepeli tiedettiin hienontuneeksi. Toisaalta näytteenottokohteet pyrittiin hajasijoittamaan maantieteellisesti mahdollisimman laajalle osalle rataverkkoa, jotta laaja otos eri lähdekiviaineksia tulisi katetuksi. Kuvassa 2.1 on esitetty raidesepelinäytteiden sijoittuminen rataverkolle sekä muiden tutkimuksessa tarkasteltujen (vrt. luku 2.3 ja 2.4) näytteiden alkuperä.

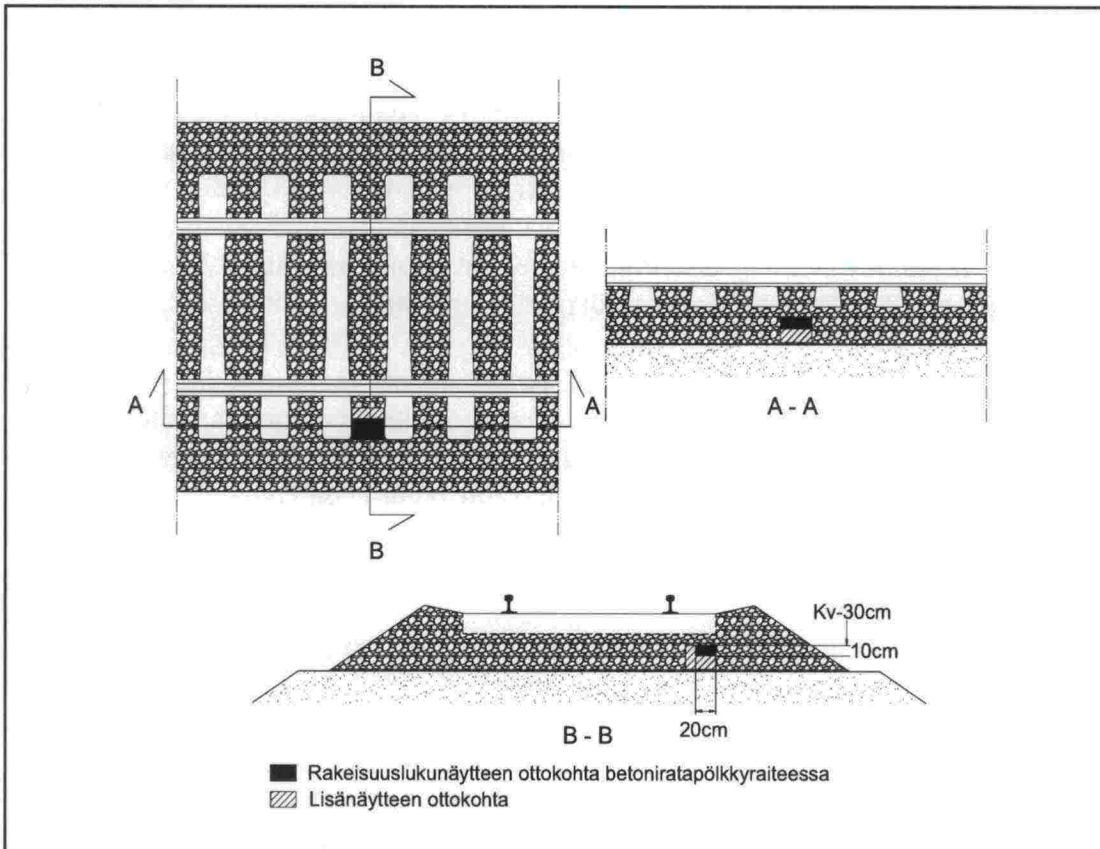


Kuva 2.1. Ratarakenteesta otettujen raidesepelinäytteiden sijoittuminen rataverkolla sekä muiden tutkimuksessa tarkasteltujen näyttemateriaalien alkuperä.

Ratahallintokeskuksen ylläpitämään tietokantaan pohjautuvien laskelmien mukaan näytteenottokohteissa raidesepeli oli ollut radassa vähimmillään 10 ja enimmillään 41 vuotta puhdistamatta (ks. taulukko 2.1). Vastaavasti kohteiden tukikerrokseen kohdistuneet liikennemäärät olivat välillä 40–340 miljoonaa bruttotonnia. Näytteet otettiin Raidesepelin laadun tutkimusohjeen (Ratahallintokeskus, 1997) mukaisesta paikasta sekä lisänäytteenä em. ohjeen mukaisen kohdan alapuolelta ja ympäriltä (ks. kuvat 2.2 ja 2.3) pyrkien erityisesti hienorakeisen aineksen talteenottoon laboratoriotutkimuksia varten.

Taulukko 2.1. Hienoainetutkimuksissa käytettyihin radan tukikerroksesta otettuihin raidesepelinäytteisiin kohdistuneet liikennekuormitukset ja raidesepelien radassaoloajat.

Rataosa	Kilometri	Raidesepeliin liikennekuormitus näytteenottoon mennessä (Mbrt)	Raidesepelin radassaoloaika näytteenottoon mennessä (vuotta)
Iisalmi-Ylivieska	586+400	110	35
Iisalmi-Ylivieska	664+600	130	40
Kokkola-Oulu	573+275	340	41
Kokkola-Oulu	624+810	340	41
Kokkola-Oulu	653+700	320	41
Kokkola-Oulu	699+990	320	41
Kuopio-Iisalmi	495+780	235	37
Kuopio-Iisalmi	518+837	235	37
Kuopio-Iisalmi	538+720	235	37
Säkäniemi-Joensuu	598+000	290	38
Turku-Toijala	233+910	175	39
Turku-Toijala	248+300	175	39
Turku-Toijala	260+300	175	39
Tuomioja-Raahe	703+170	175	37
Tuomioja-Raahe	714+600	175	37
Viinijärvi-Siilinjärvi	541+920	80	35
Viinijärvi-Siilinjärvi	577+000	80	35
Viinijärvi-Siilinjärvi	663+830	70	28
Jämsänkoski-Jyväskylä	288+400	145	23
Jämsänkoski-Jyväskylä	314+610	130	23
Kouvola-Luumäki/Etel.	230+780	95	10
Kouvola-Luumäki/Pohj.	223+830	135	10
Kouvola-Luumäki/Pohj.	231+880	135	10
Seinäjoki-Kokkola	449+000	180	23
Seinäjoki-Kokkola	480+000	180	23
Seinäjoki-Kokkola	506+000	180	23
Tampere-Orivesi/Etel.	194+510	135	36
Tampere-Orivesi/Etel.	214+030	135	36
Tampere-Orivesi/Etel.	194+080	155	41
Tornio-Kolari	999+300	50	38
Tornio-Kolari	920+180	40	29
Laurila-Rovaniemi	866+250	45	41
Kontiomäki-Vartius	680+710	45	28
Pieksamäki-Kuopio	402+470	210	30
Oulu-Laurila	806+250	210	41
Oulu-Laurila	756+150	210	41



Kuva 2.2. Raidesepelinäytteiden ottokohta tukikerroksessa.



Kuva 2.3. Tukikerros kaivettuna näytteenoton aloitustasolle Kv-30 cm.

Taulukossa 2.1 listattujen näytteiden lisäksi uusien ratapölkkyjen katkeamisen syitä selviteltäessä Tampere–Orivesi-rataosalla otettiin v. 2002 yksittäisessä aukikaivu-kohteessa näytteitä kuvasta 2.2 poiketen eri kohdilta radan poikkileikkausta. Niiden ohella tutkimusaineistossa hyödynnettiin myös maatutkan käyttöön liittyvän tutkimusprojektin yhteydessä rataosalta Tampere–Orivesi v. 2004 otetut 80 raidesepelinäytettä (Silvast ja Nurmikolu, 2005) sekä vastaavasti Pieksämäki–Kuopio-rataosalta v. 2005 otetut 80 raidesepelinäytettä. Kyseisten näytteiden tutkimuksissa pitäydettiin kuitenkin pääosin rakeisuusmäärittelyissä, mistä syystä niitä ei ole esitetty taulukossa 2.1.

Rakeisuuden osalta laajaa vertailupohjaa nyt tarkasteltujen näytteiden hienonemiselle tarjosivat myös ensisijaisesti perusparannusten suunnittelun tarpeisiin tehdyt tukikerrosnäytteiden rakeisuustarkastelut. Tarkasteluja tehtiin Ratahallintokeskuksen toimeenpanemana 1990-luvun lopulla eri rataosilta yli 1200 raidesepelinäytteen osalta. Näitä tietoja ja mm. niiden pohjalta tehtyjä raidesepelin kestoikäarvioita on käsitelty tarkemmin aiemmassa julkaisussa (Nurmikolu, 2000).

2.3 Vertailunäytteet luonnollisista maalajeista ja erotellut mineraalit

Kalliomurskeiden ja luonnollisten maalajien ominaisuuksien, erityisesti niiden routimisherkkyyden vertailun mahdollistamiseksi tutkimuksessa tarkasteltiin myös joitakin luonnon muovaamia sora- ja hiekkamateriaaleja. Vertailunäytteistä osa otettiin raidesepelinäytteenoton yhteydessä ratapenkereestä ja osa hankittiin maarakentamiseen käytetyistä muodostumista (ks. taulukko 2.2, kuva 2.1). Vertailunäytteiden tarkastelu on edellytys vaikutusten arvioinnille siirryttäessä luonnon lajittelemista materiaaleista kalliomurskeiden käyttöön eristys- ja välikerrosten materiaalina. Materiaalien rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 2.2. Vertailumateriaalit luonnon lajittelemista maalajeista.

Rataosa / Muodostuman sijainti	Kilometri	Käyttökohde	Luokiteltu maalaji
Orivesi-Jämsänkoski	248+120	Välikerros	Sorainen karkea hiekka
Kontiomäki-Vartius	710+880	Välikerros	Sorainen karkea hiekka
Oulu-Kontiomäki	km 849	Välikerros	Keskikarkea hiekka
Pieksämäki-Kuopio	402+470	Välikerros	Karkea hiekka
Kontiomäki-Taivalkoski	km 665	Raidesora	Sorainen karkea hiekka
Kankaanpää	Muodostuma		Hieno hiekka
Vesanka	Muodostuma		Sorainen karkea hiekka
Vesilahti	Muodostuma		Keskikarkea sora

Vertailutarkoituksessa routanousukokeissa käytettiin kalliomurskemateriaalien oman hienoaineksen tilalla myös kolmea erillistä mineraalista hienoainesta. Kvartsi ja maasälpä kuuluvat kallioperämme kiviaineksissa esiintyvistä mineraaleista tyypillisimpiin. Natriumbentoniitti koostuu pääosin montmorilloniitista, joka on smektiittiryhmän savimineraali ja jonka ominaispiirteenä on hyvin voimakas paisuminen veden vaikutuksesta. Bentoniittia tarkasteltiin lähinnä vedensitomis-

ominaisuuksiltaan äärimmäisenä tapauksena, eikä sen esiintyminen murskatuissa kallio-kiviaineksissa tule kyseeseen. Kvartsi- ja maasälpähienoainekset olivat peräisin Kemiöstä louhitusta kiviaineksesta (taulukko 2.3), josta mineraalit erotellaan teollisesti jauhatuksen jälkeen lasi- ja keraamisen teollisuuden tarpeisiin. Kvartsin puhtaus oli tuoteselosteen mukaan 98 %. Valittu maasälpälaatu sisälsi yhtä paljon plagioklaasia ja kalimaasälpää. Yhteensä maasälpää ilmoitettiin aineksesta olevan noin 93 % ja loppuosa kvartsia.

Taulukko 2.3. Vertailuhienoaineksina käytetyt erotellut mineraalit.

Hienoaines	Lähde	Toimittaja	Tuotetunnus
Kvartsi (98 %)	Kemiö	SP Minerals Oy Ab	FFQ 200 M
Maasälpä (93%)	Kemiö	SP Minerals Oy Ab	FFF K7 200 M
Natriumbentoniitti		Sp Minerals Oy Ab	BH-200

2.4 Uudet kalliomurskeet

Uusia kalliomurskeita käytettiin syklisissä toistokuormituskokeissa, joissa tarkasteltiin kiviaineksen hienonemista junakuormitusta simuloimaan pyrkivässä laboratorio-mittakaavaisessa järjestelyssä. Päähuomio keskitettiin eristys- ja välikerrosten kiviaineksilla kyseeseen tuleviin raekokojakautumiin. Kuusi kiviainesta oli peräisin Kerava-Lahti-oikoradan rakentamiskohteista ja yksi Lakalaivan louhokselta (ks. taulukko 2.4, kuva 2.1). Kiviaineksiksi pyrittiin valitsemaan ennakkotutkimusten tuloksiin perustuen lujuudeltaan erityyppisiä materiaaleja, joista osa olisi olemassa olevien vaatimusten perusteella käyttökelpoisia ja osa iskunkestävyydeltään ja/tai hioutuvuuden kestoaltaan vaatimukset alittavia.

Taulukko 2.4. Uusien (käyttämättömien) kalliomurskeiden alkuperät.

Lähde	Louhintapaikan paalulukema
Kerava-Lahti rakennustyömaa	50+700
Kerava-Lahti rakennustyömaa	80+500
Kerava-Lahti rakennustyömaa	85+600
Kerava-Lahti rakennustyömaa	87+500
Kerava-Lahti rakennustyömaa	88+200
Kerava-Lahti rakennustyömaa	88+800
Lakalaiva louhos	Louhos

Myös käyttämättömistä murskeista tutkittiin niiden hienoaineksen ominaisuuksia ja routimisherkkyyttä. Vertailemalla ominaisuuksia tukikerroksesta otettujen raidesepelinäytteiden vastaaviin ominaisuuksiin pyrittiin saamaan tietoa ratarakenteen kuormitusympäristössä tapahtuvan hienonemisen mekanismeista.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Tutkimukset tukikerrosnäytteiden karkearakeisille partikkeleille

3.1.1 Raekokojakautuma – seulonta

Rakeisuuslukunäytteenä otettujen tukikerrosnäytteiden raekokojakautuma määritettiin hienoaineksen talteenoton mahdollistamiseksi kuivaseulonnassa. Samalla saatiin määritetyksi 25 mm, 8 mm ja 1 mm läpäisyprosenttien summana ilmoitettavat näytteiden rakeisuusluvut. Näytteet seulottiin täryttimessä standardin (SFS-EN 933-2) mukaisella halkaisijaltaan 300 mm seulasarjalla 63, 50, 40, 31.5, 25, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 ja 0.063 mm. Koneellinen tärytysaika näyte-erää kohti oli 10 minuuttia. Lisäksi osa näytteistä pestiin 0.063 mm seulalla kuivaseulonnan jälkeen rakeiden pinnoille kiinnittyneen hienoaineksen irrottamiseksi ja sen määrän selvittämiseksi. Pesuseulan läpäissyt pesuvesi kuivatettiin talteen, jotta pesussa irronneen hienoaineksen ominaisuuksia voitiin tutkia ja verrata kuivaseulonnassa irronneen hienoaineksen ominaisuuksiin. Vertailunäytteiden raekokojakautuma määritettiin standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti pesuseulontana kuitenkin siten, että näytteet kuivaseulottiin ennen pesua, jotta hienoina saatiin tarkempia tutkimuksia varten talteen.

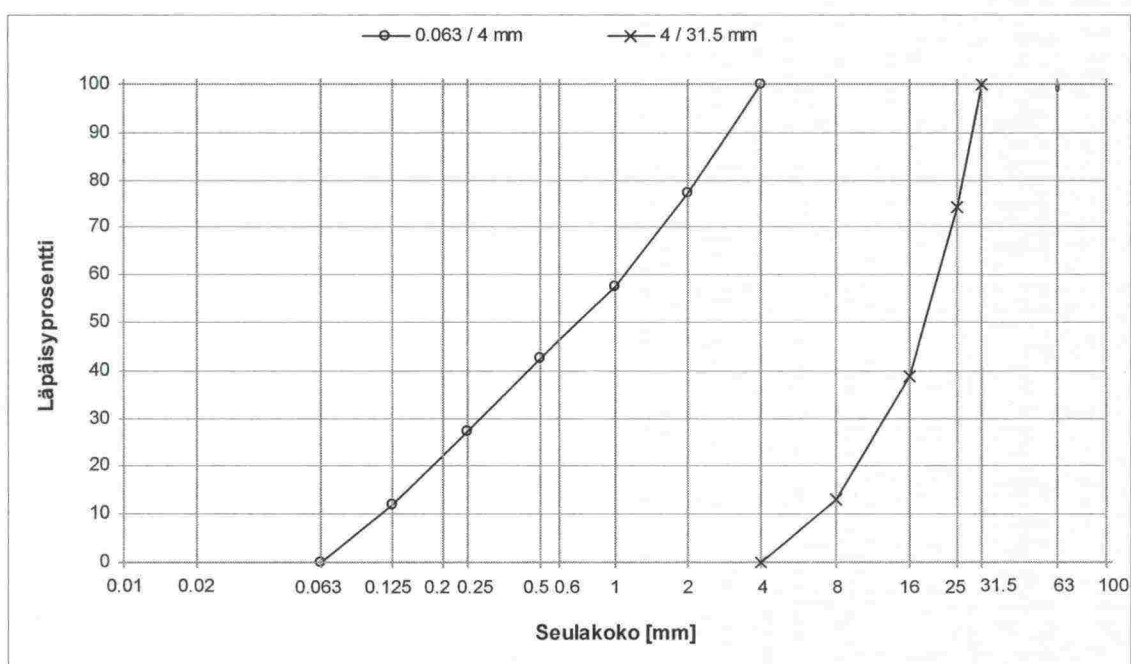
Rakeisuuslukunäytteen lisäksi tukikerroksista otettujen lisänäytteiden (vrt. kuva 2.2) rakeisuutta ei määritetty, koska näytteet otettiin tarkempien laboratoriokokeiden tarpeisiin pyrkien erityisesti hienorakeisen aineksen talteenottoon, eivätkä ne siten edustaneet tukikerrosmateriaalin rakeisuutta. Nämäkin näytteet seulottiin ja osittain myös pestiin ja käytettiin haluttuihin rakeisuuksiin suhteistettuina routanousukokeissa sekä muissa laboratoriotutkimuksissa.

3.1.2 Vedenimu ja kiintotiheys

Veden imeytymistä näytemateriaaleihin tarkasteltiin standardin SFS-EN 1097-6 luvun 8 mukaisesti tehdyissä veden absorptiokokeissa. Samassa menettelyssä määritettiin kiviainesten kiintotiheydet. Vedenimukokeessa näytemateriaalia pidetään 24 tunnin ajan vedellä kyllästettynä pyknometrissa, jonka jälkeen näyte kuivataan pintakuivaksi siten, että materiaalin huokosiin imeytynyt vesi ei kuivu. Kokeen tuloksena ilmoitetaan näytteen *veden absorptio*, joka kuvastaa näytteen huokosiin tunkeutuvan veden määrää ilmaistuna painoprosentteina kuivan näytteen massasta. Suuri veden absorptio ilmentää suurta huokoisuutta ja siten mahdollista alttiutta etenkin pakkasrapautumiselle. Toisaalta voimakas veden absorptio saattaa olla merkki kemiallisesta rapautuneisuudesta.

Kullekin tukikerrosnäytteelle vedenimukoe tehtiin täyden vertailtavuuden saavuttamiseksi samalla, kuvan 3.1 mukaisella rakeisuudella 4/31.5 mm. Näytteistä eroteltiin silmämääräisesti pois niissä vaihtelevissa määrin esiintynyt orgaaninen aines, puuratapölkynpalaset sekä mm. metallinkappaleet, sillä etenkin humusaines olisi vääristänyt runsaan vedenimunsa takia tuloksia ratkaisevasti. Raekooltaan 0.063–4 mm aineksesta erottelu ei ollut manuaalisesti mahdollista. Joistakin näytteistä koe kuitenkin tehtiin myös tästä pienemmästä laitteesta (ks. kuva 3.1) standardin SFS-EN 1097-6 luvun 9 mukaisesti siten, että niiden sisältämä orgaaninen aines hehkutettiin ennen koetta pois polttouunissa 550 asteen lämpötilassa. Kokeessa vaaditun melko suuren

näytemäärän vuoksi kaikkien näytteiden polttaminen ei ollut mielekästä. Käyttämättömien kalliomurskeiden osalta orgaaninen aines ei ollut rajoittavana tekijänä, mistä syystä vedenimukokeet tehtiin sekä em. rakeisuudella 4/31.5 mm että rakeisuudella 0.063/4 mm. Käytetyt rakeisuudet valittiin vastaamaan rakeisuusluku-näytteissä kyseisillä raekokoalueilla tavallisesti havaittuja jakautumia. Tukikerrosnäytteenoton yhteydessä Tornio-Kolari-rataosalla havaituille, selvästi rapautuneille ja vastaavasti silmämäärin arvioituna rapautumattomille raidesepielirakeille vedenimukokeet tehtiin partikkelikohtaisesti verkkokorimenetelmällä standardin SFS-EN 1097-6 liitteen B mukaisella tavalla. Luonnon lajittelemille vertailunäytteille vedenimukokeet tehtiin materiaalien luontaisella raekokojakautumalla välillä 0.063–4 mm sekä myös niiden luontaisella välin 4–31.5 mm raekokojakautumalla, mikäli aines oli riittävän karkearakeista.



Kuva 3.1. Vedenimukokeissa käytetyt kalliomurskeiden rakeisuudet.

3.1.3 Jäädytys-sulatuskäyttäytyminen

Tukikerrosnäytteiden jäädytys-sulatuskestävyyttä tarkasteltiin standardin SFS-EN 1367-1 mukaisessa testissä, jossa näytteet altistetaan veteen upotettuina kymmenelle jäädytys-sulatussyklille. Standardista poiketen rinnakkaistestinäytteitä ei ollut näytemateriaalien rajallisesta määrästä johtuen mahdollista käyttää. Tämän epäkohdan lieventämiseksi testi tehtiin kullekin tutkitulle yhdeksälle kiviainekselle käyttäen kahta eri lajitetta, 4/8 mm ja 8/16 mm. Testin tulos määritetään jäädytys-sulatussykliä seurauksena syntyvän alle 2 mm (lajitteella 4/8 mm) tai alle 4 mm (lajitteella 8/16 mm) aineksen prosentuaalisena osuutena testatun näytteen massasta.

3.1.4 Petrografinen tarkastelu ja kiviaineksen lujuus

Kahdelle tukikerrosnäytteenotossa silmämääräisesti rapautuneeksi havaitulle raidesepielille (Tor-Kol 920+180 ja Tmj-Raa 714+600) tehtiin kallioperägeologin toimesta petrografinen tutkimus ohuthieestä. Ohuthietutkimuksessa tarkastellaan noin

0.01 mm paksuuteen hiottua näytehiettä polarisaatiomikroskoopilla eri tavoin polarisoidussa valossa. Tutkimuksella määritetään ohuthieen sisältämät mineraalit paljoussuhteineen, niiden kiinnittymistapa ja raekoko, rakoilu ja muuttuneisuus sekä kivilaji ja -tyyppi. Aiemmin raportoidun tutkimuksen (Nurmikolu, 2000) yhteydessä ohuthietarkasteluja tehtiin useille tukikerrosten palteista otetuille raidesepelinäytteille. Samassa yhteydessä raportoitiin tukikerrosnäytteille tehtyt lujuus- ja muototutkimukset. Tässä yhteydessä täydentäviä lujuus- tai muototutkimuksia ei tukikerrosnäytteiden osalta ollut mahdollista tehdä. Laboratoriomittakaavaisissa uusien kiviainesten hienonemista tarkastelevissa toistokuormituskokeissa käytetyille murskeille tehtyt lujuus- ja muototutkimukset on kuvattu luvussa 3.4.3.

3.2 Tutkimukset tukikerrosnäytteiden hienoaineksille

3.2.1 Raekokojakautuma – areometri ja sedigraph

Raekooltaan alle 0.063 mm hienoainesten raekokojakautumat määritettiin osaksi areometrikokeessa ja osaksi sedigraph-laitteistolla. Molemmat menetelmät perustuvat partikkelien sedimentaationopeuden riippuvuuteen partikkelikoosta. Areometrikokeessa sedimentaationopeutta tarkastellaan vedessä seuraamalla veden tiheysmuutoksia ajan suhteen. Sedigraph-laitteistossa sedimentaatiota tarkastellaan sedimentoituvan näytteen eri tasoille kohdistetun röntgensäteilyn avulla, jolloin kokeen kesto on vain murto-osa areometrikokeen vaatimasta ajasta.

3.2.2 Mineralogia – röntgendiffraktio

Hienoainesten mineraalikoostumusten tarkastelu tehtiin Philips PW 1729 röntgendiffraktometrillä Päällystealan neuvottelukunnan menetelmäohjeen (PANK-2301) mukaisesti. Menetelmä perustuu näytteeseen kohdistetun röntgensädekimpun sirontaan, joka tapahtuu kussakin mineraalissa sille tyypillisellä, diffraktiokulmasta ja hilamitasta riippuvalla tavalla. Menetelmä on semikvantitatiivinen sikäli, että näytteessä olevat mineraalit tunnistetaan suurella tarkkuudella, mutta niiden paljoussuhteet ovat yleensä arvioita.

3.2.3 Ominaispinta-ala – typpiadsorptio

Ominaispinta-alalla tarkoitetaan partikkeleiden yhteenlaskettua raepinta-alaa massayksikköä kohti. Hienoainesten ominaispinta-alat määritettiin Micromeritics FlowSorb 2300 II laitteella typpiadsorptiomenetelmällä (PANK-2401). Menetelmässä hienoainenäytteen pinnalle adsorboidaan tietyissä vakioituissa olosuhteissa typpikaasua. Adsorboituneen typen määrän perusteella lasketaan näytteen ominaispinta-ala olettamalla, että näytteen pinnalla on yhden molekyylin vahvuinen typpikerros. Yhden typpimolekyylin peittämä ala on $16.2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$. Luonnollisesti typpimolekyylitkään eivät kykene pinnoittamaan tätä pienempiä huokosia, mistä syystä menetelmällä ei saavuteta täysin absoluuttisia tuloksia partikkeleiden kokonaispinta-alasta.

3.2.4 Veden adsorptio

Veden adsorptiokoemenetelmällä (PANK-2108) määriteltiin hienoainesten kyky adsorboida vesihöyryä 100 % suhteellisessa kosteudessa. Kokeen tuloksena saatava

vedenadsorptioluku kuvaa 7 vuorokaudessa näytteeseen adsorboituneen veden määrää ilmaistuna painoprosentteina kuivasta massasta. Vaikka menetelmän perusperiaatteessa on huomattavia yhteneväisyyksiä typpiadsorptiomenetelmään, ominaispinta-alan arviointiin vedenadsorptioluku ei suoranaisesti sovellu, koska vesimolekyylien kerrospaksuutta partikkelien pinnalla ei voida arvioida.

3.2.5 Huokoskokojakautuma – elohopeaporosimetri

Hienoainesten huokoskokojakautumia tarkasteltiin Micromeristics PoreSizer 9320 elohopeaporosimetrin avulla. Elohopeaporosimetrissa mitataan paineen vaikutusta elohopean tunkeutumisessa näyttemateriaalin huokosiin, jolloin tietyllä painelisäyksellä tunkeutuvan elohopean määrä vastaa tietyn, pintajännityksen ja paineen perusteella määräytyvän, huokoskoalueen tilavuutta näytteessä. Elohopeaporosimetrilla on mahdollista määrittää kooltaan 0.006...150 µm huokosten tilavuus ja huokosseinämien pinta-ala. Huokoskokojakautumia tarkasteltiin kahdelle rinnakkaisnäytteelle tehtyjen kokeiden keskimääräisistä tuloksista.

3.2.6 Humuspitoisuus – polttomenetelmä

Tukikerroksesta otettujen raidesepelinäytteiden hienoaineksen humuspitoisuus määritettiin polttomenetelmällä Geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) mukaisesti. Polttomenetelmässä näytettä hehkutetaan 800 asteen lämpötilassa vähintään yhden tunnin ajan, jolloin orgaaninen aines palaa pois. Hehkutushäviö kuvaa poltossa hävinneen massan prosentuaalista osuutta kuivan alkuperäisen aineksen massa. Kitkamaalajeilla hehkutushäviön on yleensä arvioitu vastaavan melko tarkkaan humuspitoisuutta. Hienorakeisissa maalajeissa tulisi em. ohjeiden mukaan humuspitoisuutta arvioitaessa hehkutushäviöstä vähentää savespitoisuuden perusteella määräytyvä hehkutuksessa haihtuneen kideveden osuus. Tarkasteltujen tukikerrosnäytteiden hienoainesten savespitoisuudet olivat melko vähäisiä ja toisaalta kaikki hyvin samansuuruisia, likimäärin 10 % (vrt. taulukko 4.1). Tällä perusteella arvioituna kideveden osuus hehkutushäviöstä kaikissa näytteissä olisi likimäärin samansuuruinen, ohjeen mukaisesti noin yhden prosenttiyksikön verran. Asiaan liittyvistä epävarmuuksista johtuen luvussa 4 tuloksia käsiteltäessä tarkastellaan hehkutushäviötä kokonaisuudessaan ilman arvioituja kidevesivähennyksiä. Em. oletuksilla humuspitoisuuksia voidaan siis haluttaessa approksimoida vähentämällä esitetyistä hehkutushäviöistä noin 1 prosenttiyksikkö.

3.2.7 Pintarakenne – pyyhkäisyelektronimikroskooppi

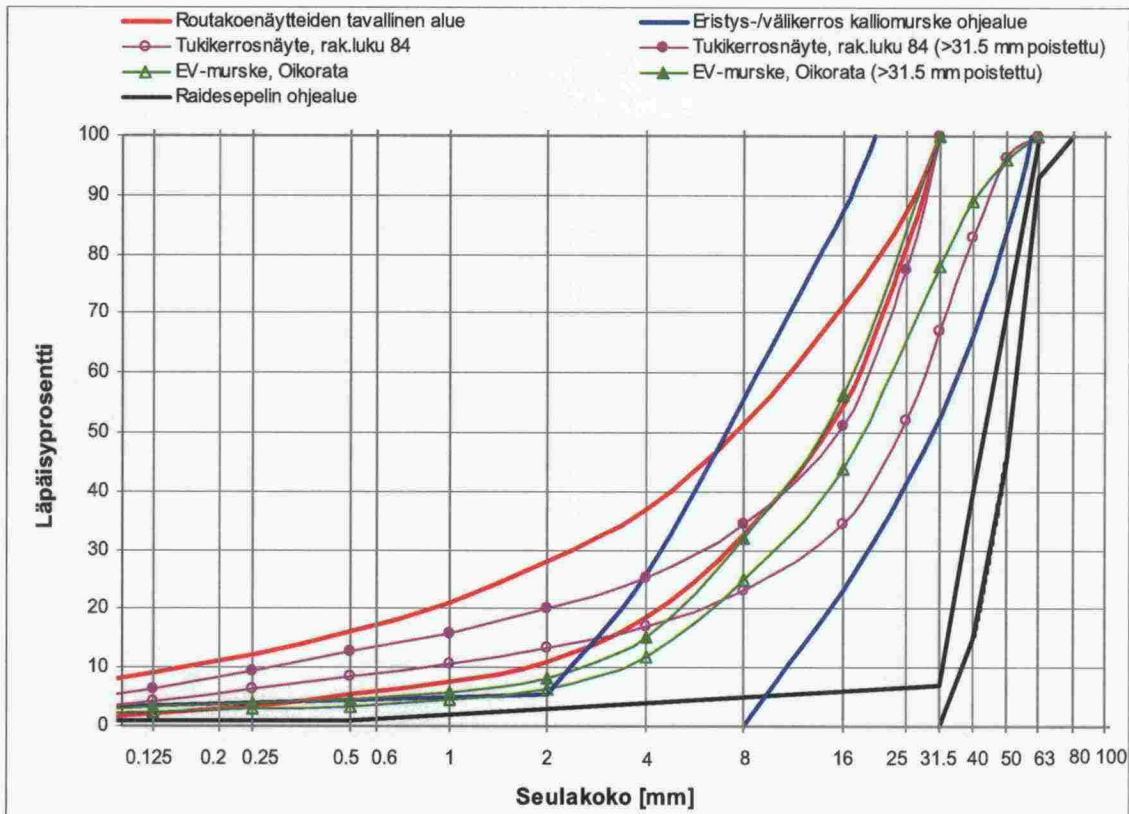
Hienoainesten pintarakennetta tarkasteltiin TTY:n Materiaaliopin laitoksella Philips XL 30 -pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (Scanning Electron Microscope, SEM). Tarkastellut näytteet valmistettiin levittämällä tasainen kerros hienoainesta sähköä johtavalla liimalla pinnoitetulle näytteenpitimelle. Tämän jälkeen näytteet päällystettiin ohuella kultauksella sähköä johtaviksi. Näytteet kuvattiin 200- ja 500-kertaisina suurennoksina.

3.3 Routanousukokeet

3.3.1 Koeohjelman pääperiaatteet

Routanousukokeissa tutkittiin ratarakenteissa käytettävien kalliomurskeiden routimisherkkyyttä ja sen kehittymistä kiviainesten hienonemisen myötä. Erityisesti tarkasteltiin routimisherkkyyden riippuvuutta hienoaineksen määrästä ja toisaalta eroja todellisissa kuormitusympäristöissä syntyneiden hienoaineslaatujen routimisherkkyyksissä. Hienoaineksen määrän vaikutusta routimisherkkyyteen arvioitiin etenkin uusille kalliomurskeille tehdyissä routanousukokeissa. Tukikerrosnäytteiden avulla pystyttiin vastaavasti arvioimaan todellisessa kuormitusympäristössä eri lähdekiviaineksista syntyvissä hienoaineslaadun vaihtelun rajoissa hienoaineksen laadun vaikutusta routimisherkkyyteen. Kalliomurskeiden ja luonnollisten maalajien vertailun mahdollistamiseksi tutkittiin myös joidenkin sora- ja hiekkamateriaalien routimisherkkyyttä.

Hienoainesten laadun vaikutusten vertailemiseksi tukikerrosnäytteistä tehtyt routakoenäytteet valmistettiin pääosin suhteistamalla näytteiden raekokojakautumat seulotuista lajitteista halutun mukaisiksi. Kuvassa 3.2 on esitetty routakokeissa tyypillisimmin käytetty suhteistettujen näytteiden raekokojakautuma-alue (punaiset käyrät). Lisäksi kokeita tehtiin joillekin kuvassa esitettyä selvästi hienorakeisemmille näytteille. Kussakin kokeessa käytetyt rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 6. Routakoenäytteiden raekokojakautumien valinta sidottiin hienontuneiden tukikerrosnäytteiden tyypillisiin raekokojakautumiin sekä eristys- ja välikerrosmurskeen ohjeelliseen raekokojakautumaan ja mahdolliseksi arvioituun hienonemiskehitykseen. Koemittakaavasta johtuen routakoenäytteiden maksimiraekooksi rajattiin 31.5 mm. Osasta tukikerrosnäytteistä tehtiin routakoe myös niiden luontaisella raekokojakautumalla alle 31.5 mm aineksesta. Sora- ja hiekkänäytteiden routanousukokeet tehtiin niiden luontaisella alle 31.5 mm aineksen raekokojakautumalla.



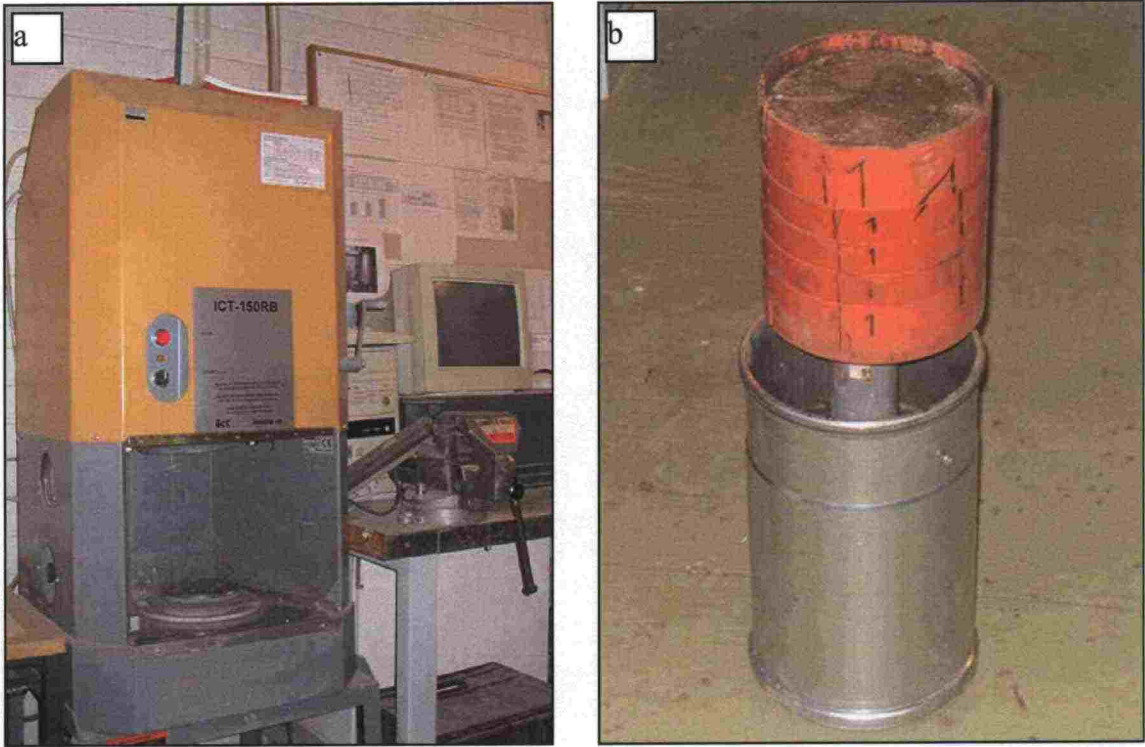
Kuva 3.2. Seulotuista lajitteista suhteistamalla valmistettujen tyypillisten routakoenäytteiden raekokojakautumat, tyypillisen hienontuneen tukikerrosnäytteen sekä Oikoradalla EV-kerrosmateriaalina käytetyn kalliomurskeen raekokojakautumat. Jälkimmäisten osalta on esitetty myös raekokojakautumat alle 31.5 mm aineksen osalta.

3.3.2 Näytteen valmistus

Seulotuista lajitteista suhteuttamalla valmistetut näytteet sekoitettiin huolellisesti samalla, kun niihin lisättiin hienoainespitoisuuden perusteella valittu vesimäärä. Esimerkiksi tyypillisellä 5 % hienoainespitoisuudella vesipitoisuudeksi valittiin näytteiden valmistusvaiheessa 5 prosenttia. Näytteet tiivistettiin Intensive Compactor Tester - 150RB (ICT) -kiertotiivistinlaitteella (kuva 3.3a) sisähalkaisijaltaan 150 mm PVC-putkeen, joka toimi kokeessa näytemuottina. Ennen vakioidun näytteen valmistustavan valitsemista tarkasteltiin muottiputken ja toisaalta tiivistysvoimakkuuden vaikutuksia kokeessa havaittavaan näytteen routimisherkkyyteen.

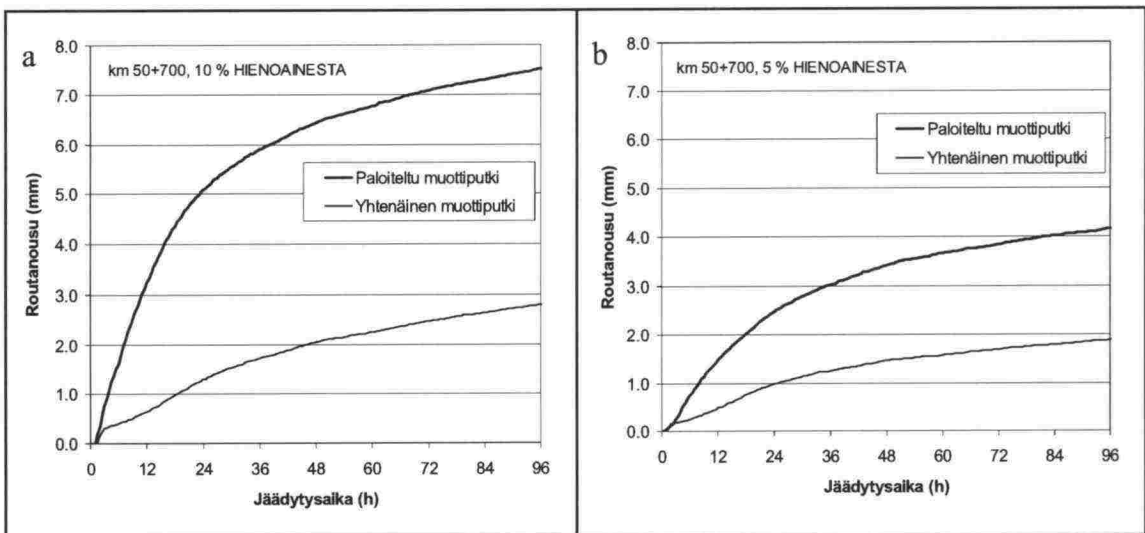
Suurimpana menetelmään liittyvänä ongelmana laboratoriomittakaavaisissa routanousukokeissa on pidetty näytemateriaalin ja sen muotin välisen rajapinnan vaikutusta routanousun muodostumista rajoittavana tekijänä. Kun tutkittava materiaali pyrkii jäälinssin muodostumisen myötä nousemaan näytemuotin sisällä, näytemuotin seinämien ja kiviaineksen rajapinnassa vaikuttava kitkavoima ja sitä lisäävä veden jäätyminen rajoittavat routanousun syntymistä. Ongelmaan on etsitty useita erilaisia ratkaisuja, joita mm. Kujala (1991) on käsitellyt. ICT-laitteella tehtävän tiivistyksen kanssa mahdollinen ja periaatteiltaan tutkimuksen tavoitteisiin nähden toimivin vaihtoehto arvioitiin olevan näytemuottiputken paloittelu (ks. kuva 3.3b). Paloitellussa muottiputkessa yksittäisten muottirenkaiden on mahdollista irtaantua toisistaan routanousun myötä. Tällöin muotin ja kiviaineksen välistä liikettä tapahtuu ainoastaan osassa yhden muottirenkaan sisäpintaa ja nousua vastustava kitkavoima on yhtenäiseen

muottiputkeen verrattuna oleellisesti pienempi. Myös ISSMFE (1989) on suositellut paloittelun muottiputken käyttöä.



Kuva 3.3. ICT-kiertotiivistin (vas.) ja paloitetuun PVC-muottiin tiivistetyn routakoenäytteen poistaminen tiivistysvaiheen tukimuotista (oik.).

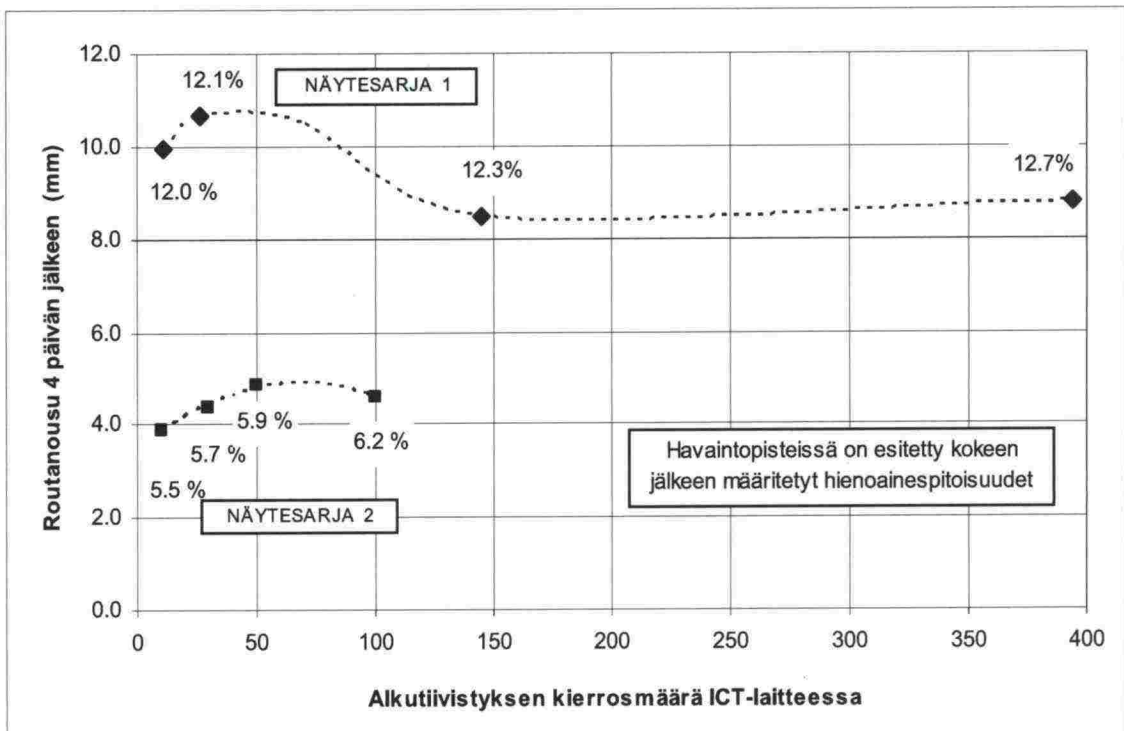
Yhtenäiseen muottiputkeen verrattuna muottiputken paloittelun havaittiin määräävästi vähentävän em. kitkasta ja jäätymisestä johtuvaa routanousua rajoittavaa vaikutusta. Routanousu todettiin täysin vastaavilla näyttemateriaaleilla paloittelussa muottiputkessa jäädytysajasta riippuen 2-4-kertaiseksi yhtenäiseen muottiputkeen verrattuna (esim. kuva 3.4).



Kuva 3.4. Kaksi esimerkkiä keskenään täysin vastaavien näytteiden routanousuista paloittelussa ja kokonaisessa muottiputkessa.

Joillakin materiaaleilla paloittelun muotin käyttöä saattaa rajoittaa se, että etenkin suurilla routanousuilla näytemateriaalin on mahdollista alkaa varista routanousun myötä ilman muottia jääneistä reunoistaan (vrt. esim. kuva 3.6). Ainakaan tutkituilla materiaaleilla tämä ei muodostunut merkittäväksi ongelmaksi. Toisaalta paloittelun muotin käytön mahdollistama muottirenkaiden erkaantuminen toisistaan aiheuttaa myös renkaisiin kiinnitettyjen lämpötila-antureiden siirtymisen. Tästä seuraa lievä virhe mm. segregatiopotentialin laskentaan, mitä on käsitelty tarkemmin luvussa 3.3.4. Näistä rajoitteista huolimatta tutkimuksessa päädyttiin paloittelun muottiputken käyttöön, koska tavoitteena oli ensi sijassa tarkastella verraten lievästi routivia materiaaleja tai materiaaleja routimattomuuden ja routimisen häilyvällä rajalla, ei niinkään selvästi routivien materiaalien routimisen voimakkuutta. Tavoitteena oli tarkastella nimenomaan kiviainesten routimisherkkyttä routimiselle suotuisissa olosuhteissa, jolloin koejärjestelyistä aiheutuvien routimista rajoittavien tekijöiden minimointi koettiin ensisijaisen tärkeänä asiana.

Sopivimman tiivistystyömäärän valitsemiseksi alkutiivistyksen merkitystä kokeessa havaittavaan routanousuun arvioitiin kahdessa koesarjassa (kuva 3.5). Tarkastelut antoivat viitteitä routanousun hienoisesta vähenemisestä erittäin voimakkaan tiivistyksen ja toisaalta myös kevyen tiivistyksen seurauksena. Kaiken kaikkiaan alkutiivistystyömäärän merkitys syntyvään routanousuun vaikutti tulosten perusteella kuitenkin varsin vähäiseltä ja on ainakin osittain mahdollisesti selitettävissä kokeen toistettavuuden epätarkkuudella. Toisaalta hyvin voimakkaan tiivistyksen osalta hieman vähäisempää routanousua selittävänä tekijänä saattaisi olla jo edellä käsitellyn kitkavaikutuksen lisääntyminen materiaalin pakkautuessa hyvin tiukasti muottiputkea vasten. Suurten tiivistystyömäärien suhteen huomattavaa on vähäisempi routanousu huolimatta tiivistyksessä syntyneestä lisähienoaineksesta. Vastaavasti kevyen tiivistyksen osalta teoriassa mahdollinen vaikutusmekanismi saattaisi olla in-situ routanousun pieneneminen johtuen suuremman huokoisuuden myötä mahdollisesti heikentyneestä vedenpidätyskyvystä ja toisaalta veden laajenemiselle käytettävissä olevan huokostilan lisääntymisestä.



Kuva 3.5. Näytteen tiivistyksen voimakkuuden vaikutus havaittuihin routanousuihin kahdessa eri koesarjassa. Materiaalit kummassakin koesarjassa olivat alun perin toisiaan vastaavia. Voimakas tiivistys synnytti näytemateriaaliin hieman kevyttä tiivistystä enemmän hienoaainesta.

Tiivistystyömäärän vaikutuksista saatujen viitteiden perusteella kiviaineksen routimattomuutta tarkastelevissa koesarjoissa näytteet valmistettiin kohtalaisella tiivistystyöllä. Tiivistystavaksi vakioitiin 50 kierrosta ICT-laitteessa 6 barin mittari-paineella. Materiaalin kiintotiheyden ja kokemusten myötä saatujen tiivistymis-havaintojen perusteella näytekorkeudeksi pyrittiin mitoittamaan 150 mm valitsemalla tiivistykseen sopiva näytemäärä. Käytännössä näytekorkeudet vaihtelivat pääosin välillä 145–155 mm.

Routakoetuloksia arvioitaessa näytteiden hienoaainespitoisuuksina käytettiin niistä kokeen jälkeen pesuseulonnassa määritettyä hienoaainespitoisuutta, joka siten sisältää tiivistyksessä syntyvän hienoainekseen. Vakioidussa 50 kierroksen (6 bar) tiivistyksessä ja materiaalin käsittelyssä syntyneet hienoaainemäärät vaihtelivat kiviaineksestä ja raekokojakautumasta riippuen pääosin välillä 0.5–1.1 prosenttiyksikköä.

3.3.3 Koejärjestelyt

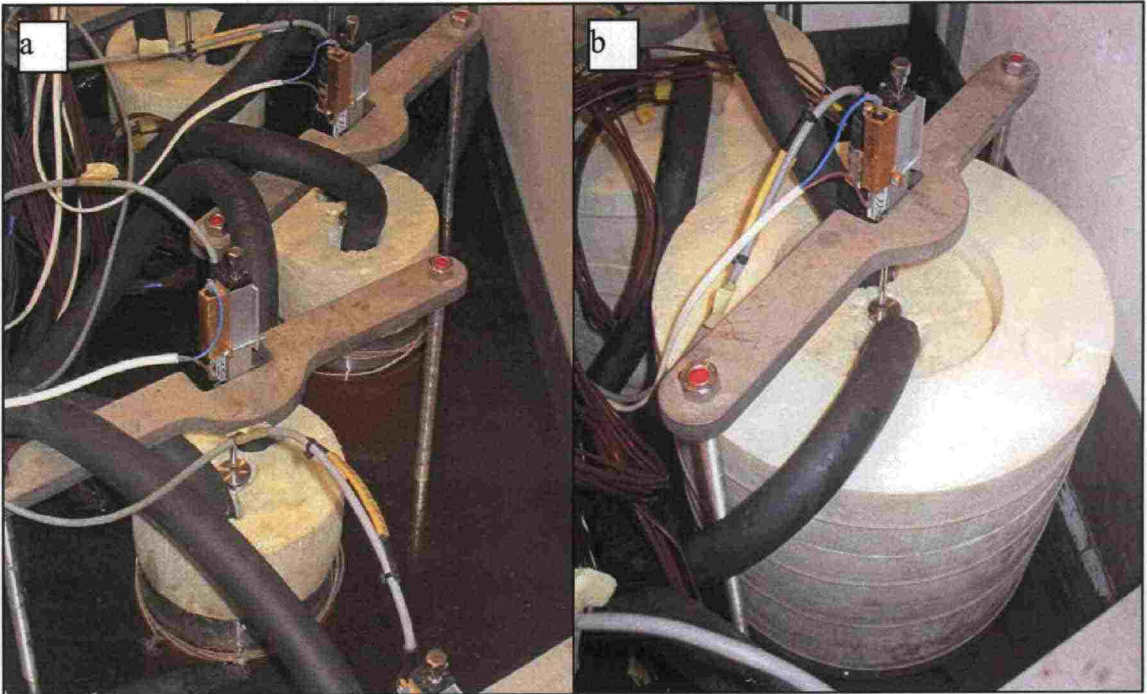
Laajasti käytössä olevan standardoidun routanousukoemenetelmän puuttuessa eri koejärjestelyissä saatujen tulosten vertailu on hankalaa. Suomessakin käytössä olevat järjestelyt poikkeavat jossain määrin toisistaan. Koska eri menetelmillä saatujen tulosten vertailu olisi joka tapauksessa rajoittunutta, koejärjestely kehitettiin parhaiten juuri tämän tutkimuksen tarpeisiin sopivaksi.

Routanousukokeita varten rakennetun laitteiston avulla oli mahdollista jäädyyttää samanaikaisesti neljä näytettä (kuva 3.6). Ennen kokeen käynnistystä kuhunkin näytteeseen kiinnitettiin 25 mm välein 7 sulavassa jäämurskassa kalibroitu termolanka-lämpötila-anturia. Anturit työnnettiin muottirenkaisiin porattuihin pieniin reikiin, jolloin

ne olivat kosketuksissa suoraan tutkittavaan materiaaliin. Kokeen aluksi näytteet kyllästettiin pitämällä niitä noin vuorokauden ajan veteen upotettuna (kuva 3.7a). Samassa yhteydessä näytteet jäähdytettiin 1–2 asteen lämpötilaan. Tämän jälkeen veden pinnan taso alennettiin noin 12 mm näytemateriaalin alapinnan tason yläpuolelle ja näytteet lämpöeristettiin radiaalisten lämpövirtausten minimoimiseksi (kuva 3.7b). Näytteet jäähdytettiin lämpöeristetyssä pakastinaltaassa luonnollisessa jäätymissuunnassa ylhäältä alaspäin. Jääditys toteutettiin johtamalla toisen kylmäkoneen viilentämän jäähdytysnesteen kierto näytteiden ylämäntiin. Näytteiden yläpintojen lämpötila säädettiin tietokoneohjatusti -3 asteeseen ja näytteiden alapinnat alamäntien vesikierron avulla +1 asteen lämpötilaan. Näytteiden lisäveden saantimahdollisuus oli jäädätyksen aikana turvattu alimman muottirenkaan ja alamännän välistä pitämällä vedenpinnan taso noin 12 mm näytteen alapinnan tason yläpuolella. Routanousua mitattiin kokeen aikana näyteraameihin kiinnitettyjen siirtymäantureiden avulla. Siirtymät ja lämpötilat tallentuivat tulostiedostoon viiden minuutin välein. Jäädätyksvaihetta jatkettiin vähintään neljän vuorokauden ajan. Routimista vastustavana kuormana kokeissa oli ainoastaan ylämäntien aiheuttama 3 kPa paine.



Kuva 3.6. Routanousukoejärjestely. Näytteet nostettu kokeen jälkeen apupöydälle ja lämmöneristeet purettu.



Kuva 3.7. Näytteiden kyllästysvaihe (vas.), jossa näytteet upotettu kokonaisuudessaan veteen ja näytteiden jäädytyksen aikainen lämmöneristys (oik.).

Kehitetty koejärjestely vastaa tietyiltä osiltaan, mm. jäädytystavaltaan ja lämpötiloiltaan, Tien pohja- ja päällysrakenteen tutkimusohjelmassa (TPPT) laaditun menetelmäkuvausten (Onninen, 2001) mukaista VTT Yhdyskuntatekniikan kehittämää koejärjestelyä. Oleelliset erot liittyvät näytemuottiin ja lämpötilamittaukseen, sillä VTT:n järjestelyssä näyte tiivistetään halkaistavan muotin sisällä, jäädytetään käsittelyn mahdollistamiseksi ja asennetaan kumikalvoon pujotettuna halkaistavan sellin sisään varsinaista routanousukoetta varten. Lämpötilan mittausta tapahtuu sellin seinämistä, jolloin mittaustaso ei routanousun seurauksena muutu. Kuitenkin tässäkin järjestelyssä on havaittu sellin seinämän ja näytteen välisen kitkan aiheuttamia ongelmia silikonivoitelustakin huolimatta (Koskinen, 1998). Oulun yliopistossa on käytetty eri menettelyjä routanousua rajoittavan sivukitkan vaikutusten välttämiseksi, mm. paloitetuun muottiin perustuvaa järjestelyä, mutta yleisesti käytössä on ollut yhtenäiseen muottiputkeen tiivistetyn näytteen testaus.

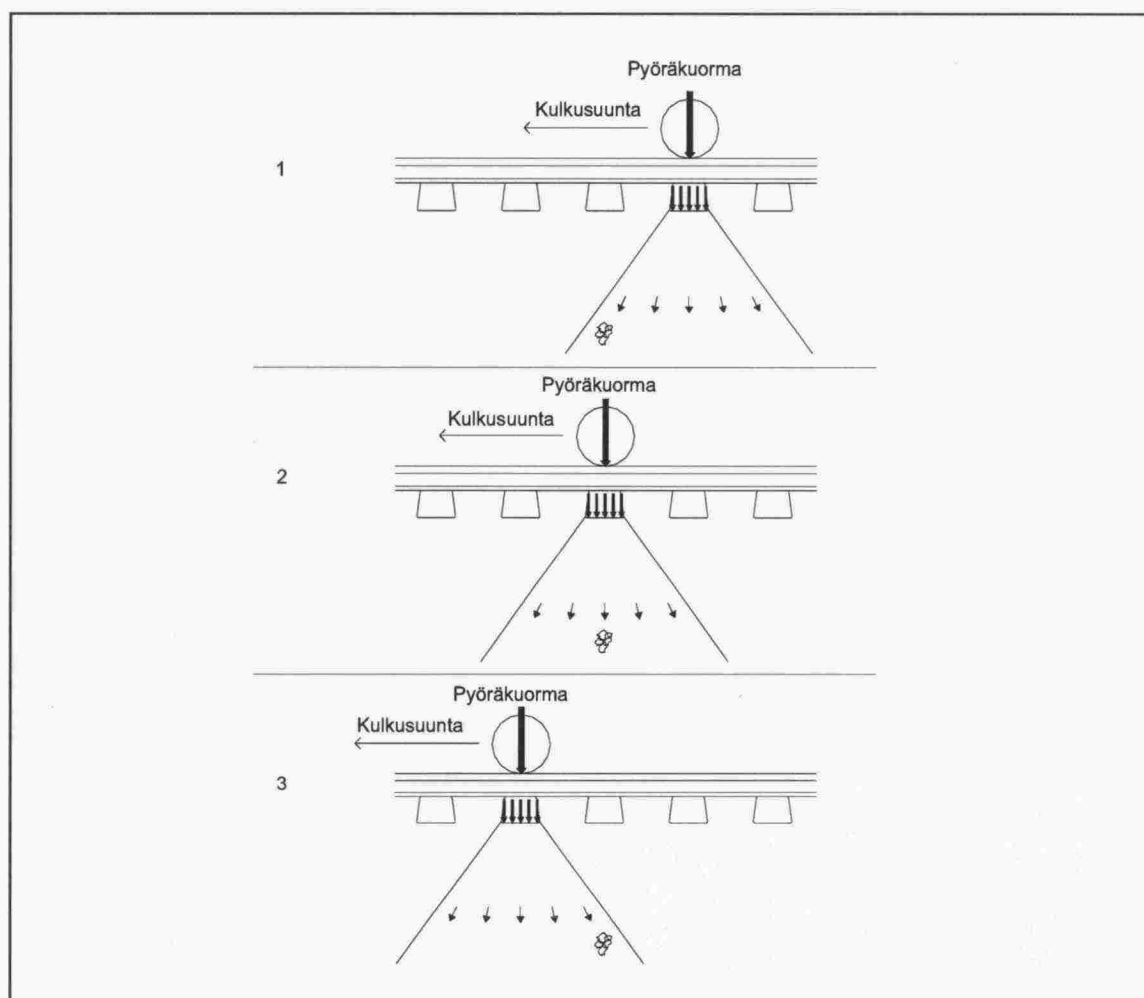
3.4 Toistokuormituskokeet kiviaineksen hienonemistarkasteluissa

3.4.1 Junakuormitusta simuloiva toistokuormituslaitteisto

Laboratoriomittakaavaiset tarkastelut koskien liikennekuormituksen vaikutusta väylärakenteiden kiviainesten hienonemiseen ovat suurelta osin rajoittuneet järjestelyihin, joissa kiviainekseen kohdistuvan kuormituksen suunta säilyy kuormituksen ajan samana. Näissä järjestelyissä hienoneminen on pääsääntöisesti jäänyt selvästi kenttäolosuhteissa havaittua hienonemista vähäisemmäksi ja kuormituksen vaikutus on ollut lähinnä kiviaineksen tiivistyminen (Nurmikolu, 2004). Kuitenkin aivan hiljattain *liikkuvan* pyöräkuorman merkitystä on alettu korostaa (Momoya ja Sekine, 2005).

Muuttumattoman kuormitus suunnan järjestelyyn verrattuna todellinen liikennekuormitus on kiviainekselle ankarampaa johtuen tiettyyn partikkeliryhmään

kohdistuvan kuormituksen suunnan vaihtumisesta yllä kulkevan junan liikkua. Partikkeliryhmään kohdistuvan suurimman pääjännityksen suunnan muuttumista on hahmoteltu periaatteellisessa kuvassa 3.8. Aluksi suurin pääjännitys kohdistuu partikkeliryhmään junan tulosuunnasta (1). Pääjännityksen suunta kiertyy junan lähestyessä. Kun akseli on suoraan tarkasteltavan partikkeliryhmän yläpuolella, suurin pääjännitys vaikuttaa vertikaalitasossa (2). Akselin edelleen liikkua pääjännityssuunta jatkaa kiertymistään (3). Kuvan 3.8 mukaisena esitettyä kuormitus suunnan kiertymistä lieventää todellisessa tilanteessa jossain määrin se, että kuormitus välittyy rakenteeseen käytännössä aina useamman kuin yhden ratapölkyn välityksellä. Tästä huolimatta periaate kuormitus suunnan kiertymisestä ei muutu.



Kuva 3.8. Periaate tiettyyn partikkeliryhmään kohdistuvan suurimman pääjännityssuunnan muuttumisesta junan etenemisen (1 → 2 → 3) seurauksena.

Kuormitus suunnan kiertymisen seurauksena myös rakeiden murtumista ja hioutumista aiheuttavat partikkelien väliset liikkeet pyrkivät tapahtumaan vaihtelevilla kontaktipinnoilla ja eri suunnissa. Tämä ei ole mahdollista muuttumattoman kuormitus suunnan koejärjestelyissä, mistä syystä ne johtavat verraten nopeasti ainoastaan materiaalin tiivistymiseen ja stabiloituvaa käyttäytymiseen. Näistä syistä johtuen pääjännityssuunnan kiertymisen mahdollistaminen oli keskeinen lähtökohta todellisen junakuormituksen simuloimiseksi kehitetyssä laboratoriokoejärjestelyssä.

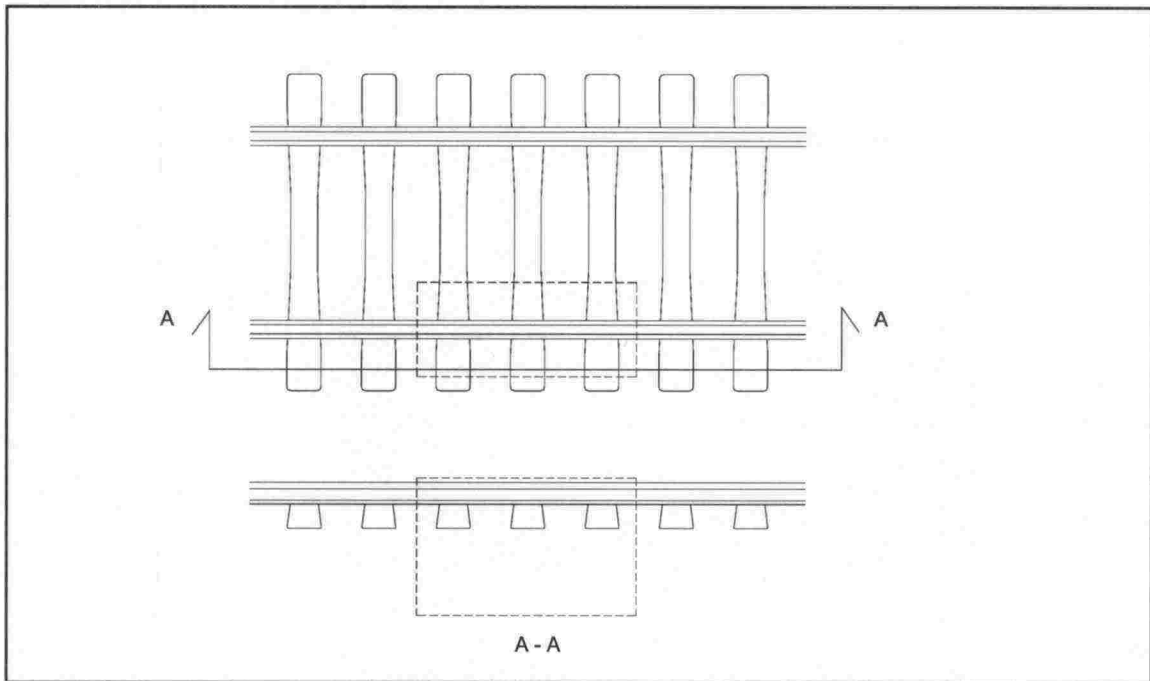
Erityisesti eristys- ja välikerrosten kalliomurskeiden hienonemisen ennakoimiseksi kehitettiin laboratoriomittakaavainen kuormitusjärjestely (kuva 3.9). Laitteistolla

pyrittiin simuloimaan radan rakennekerrosten kiviainekseen junaliikenteestä kohdistuvaa syklistä kuormitusta niiltä osin, mitkä oleellisin vaikkavat kiviainesten hienonemiseen. Koejärjestelyyn kuuluu ulkomitoiltaan $1220 \times 600 \times 515 \text{ mm}^3$ (pituus \times korkeus \times leveys) teräslaatikko testattavalle materiaalille, kolme ratapölkkysegmenttiä simuloivaa kuormituslevyä ($440 \times 250 \text{ mm}^2$, pit. \times lev.), kolme erillisesti ohjattua hydraulista kuormituslinteriä sisältävä kuormituskehä sekä hydraulikoneikko.



Kuva 3.9. Radan rakennekerrosten kiviainekseen kohdistuvan junakuormituksen aiheuttaman jauhautumisen simuloimiseksi kehitetty toistokuormituslaitteisto.

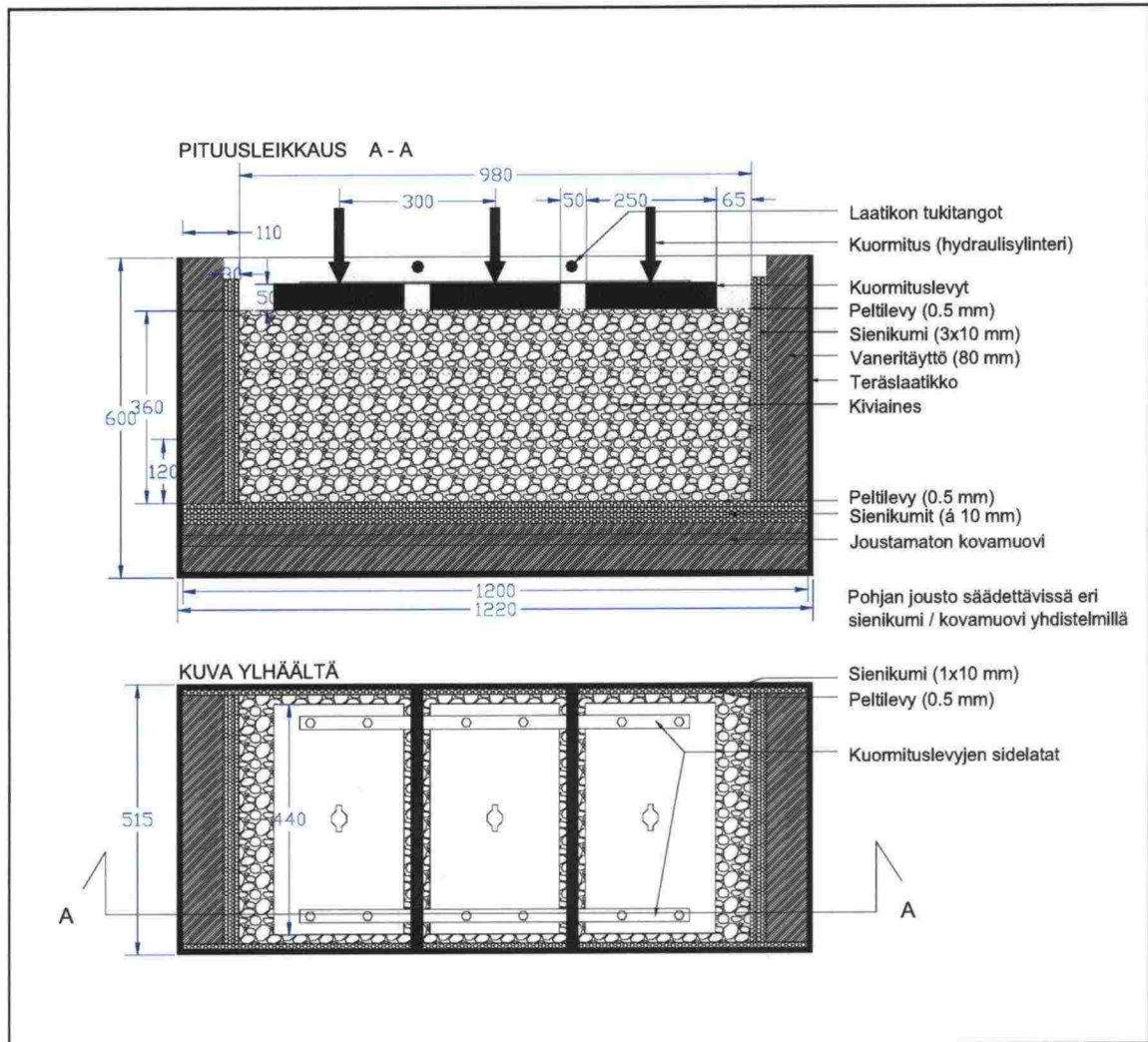
Järjestelyssä pyrittiin periaatteessa simuloimaan ratapölkkyistä ratarakenteeseen välittyvää junakuormitusta kuvan 3.10 mukaisella kolmen ratapölkyn mittaisella osuudella toisen kiskon alapuolella



Kuva 3.10. Hahmotelma radan osasta, jota kuormitusjärjestelyssä pyrittiin kiviaineksen hienonemiseen vaikuttavien tekijöiden suhteen oleellisilta osin simuloimaan.

Koestuslaatikkoa on havainnollistettu kuvassa 3.11. Laatikon pohjalle järjestettiin kimmoisuutensa erinomaisesti säilyttävien sienikumilevyjen paksuutta säätelemällä halutun suuruinen jousto, jolla pyrittiin simuloimaan pohjamaan käyttäytymistä. Osassa kokeista sienikumilevyjen päällä käytettiin kuormitusta jossain määrin jakavaa 0.5 mm peltilevyä ja osassa kokeista kiviaines asennettiin suoraan sienikumin päälle. Peltilevyä käytettäessä pohjamaata simuloivan kumin jousto tapahtui kuormittavan levyn alla laajemmalle alueelle jakautuneena ja suuruudeltaan vähäisempänä verrattuna yksittäisten rakeiden suuremman painautumisen mahdollistavaan tilanteeseen ilman peltiä. Peltilevyn vaikutuksia on käsitelty myöhemmin luvussa 6.2.2.

Laatikon päädyissä käytettiin vanerisia täytepaloja sekä 0.5 mm peltilevyllä pinnoitettua 30 mm sienikumikerrosta. Kumilla pyrittiin pienentämään laatikon päätyjen aiheuttamaa rajapintaongelmaa mahdollistamalla paremmin kiviaineksen palautuva liike horisontaalisuunnassa. Vastaavaan tarkoitukseen käytettiin 0.5 mm peltilevyllä pinnoitettua 10 mm sienikumikerrosta myös laatikon pitkällä sivuilla. Vaikka sienikumia käyttämällä ongelmaa pystyttiin jossain määrin pienentämään, laatikon reunojen läheisyydessä havaittu hienoneminen oli poikkeuksetta muuhun materiaaliin nähden voimakkaampaa ja täten todellisessa ratarakenteessa tapahtuvaa hienonemista vääristävää (vrt. luku 6.2.4). Reuna-alueiden rajoitteet olivat suurin yksittäinen ongelma todellisen junakuormituksen vaikutusten simuloinnissa.



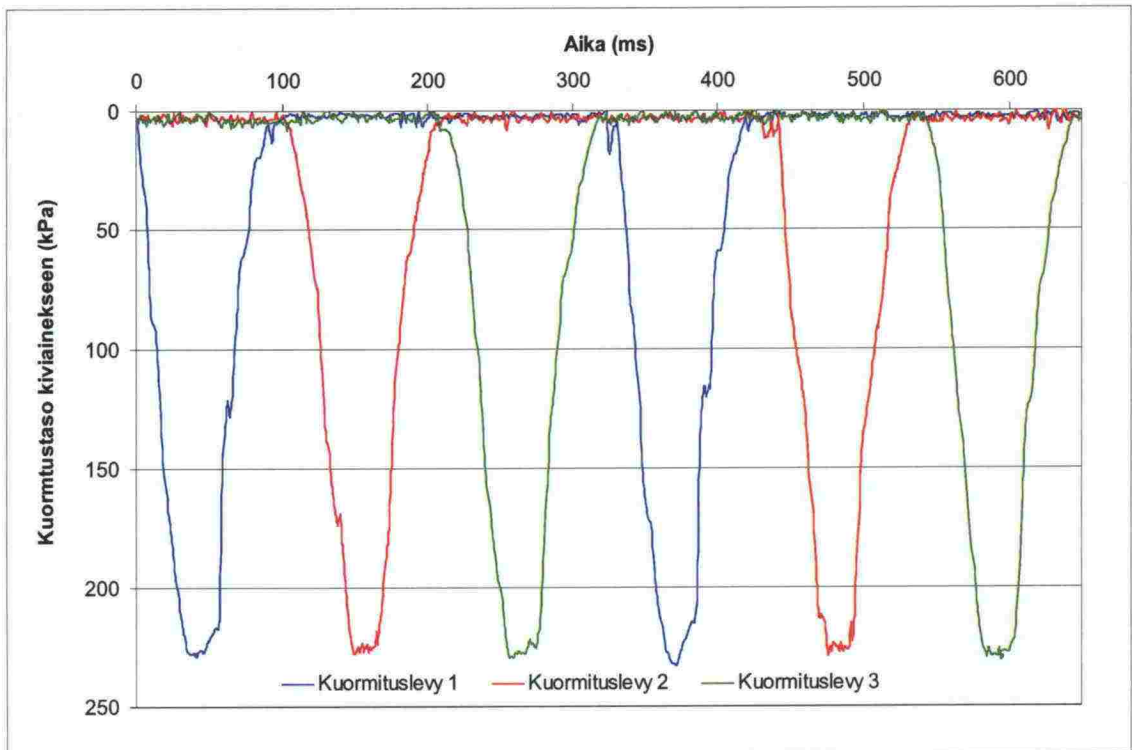
Kuva 3.11. Koestuslaatikko toistokuormitusjärjestelyssä.

Testattava materiaali suhteistettiin aluksi yhdeksässä erillisessä erässä haluttuun raekokojakautumaan (kuva 3.12a). Materiaali tiivistettiin (kuva 3.12c) vakioidulla tärytysmenettelyllä laatikkoon kolmessa 120 mm kerroksessa, jolloin kiviaineksen kokonaispaksuudeksi muodostui noin 360 mm. Tärytystiivistyksen ja kiviaineksen käsittelyn vaikutus hienonemiseen oli melko vähäinen (vrt. luku 6.2.5). Kuhunkin kerrokseen käytettiin kolme erillistä näyte-erää, jotka asennettiin mahdollisimman hyvin sekoittuneen raekokojakautuman aikaansaamiseksi jakomuottia (kuva 3.12b) hyödyntäen. Testattava kiviaines täytti kuvan 3.11 mukaisesti laatikon pituudesta 980 mm ja leveydestä 475 mm, jolloin kiviaineksen tilavuus kokeissa oli noin 170 dm^3 . Tiivistetyn kiviaineksen (kuva 3.12d) irtotiheydet vaihtelivat raekokojakautumasta riippuen hyvin tasarakeisten noin 1.55 t/m^3 :sta suhteistuneiden rakeisuuksien noin 1.95 t/m^3 :iin. Näin ollen yksittäiseen kokeeseen tarvittiin yleensä runsas 300 kg kiviainesta.



Kuva 3.12. Yhdeksään laatikkoon haluttuun raekokajakautumaan suhteistetun (a) kiviaineksen asentaminen koestuslaatikkoon jakomuottia (b) hyödyntäen. Kerroksittain tehtävän tärytystiivistyksen (c) jälkeen kiviaineksen pinta (d) on tasainen.

Sähköventtiilien automaattiohjauksen avulla hydraulisylintereihin ohjattu paine välittyi kiviainekseen teräksisistä kuormituslevyistä, jotka simuloivat ratapölkkysegmenttiä välittömästi kiskon alla (vrt. kuva 3.10). Kuormitus kohdistettiin vuorotellen kuhunkin kuormituslevyyn, jolloin tiettyyn partikkeliryhmään kohdistuvan kuormituksen suunta vaihtui samalla tavalla kuin junan liikkuessa (vrt. kuva 3.8). Esimerkiksi, jos junan kulkusuunta oletetaan oikealta vasemmalle, kuormitus kohdistetaan ensimmäiseksi oikean puoleiseen kuormituslevyyn, poistetaan ja kohdistetaan keskimmäiseen levyyn, jälleen poistetaan ja kohdistetaan vasemman puoleiseen levyyn. Kuormitustilanne havainnollistuu kuvan 3.13 mukaisessa esimerkissä kuormituslevyihin kohdistettujen voimien mittauksista. Yksi kuvatun mukainen kolmen kuormituslevyn peräkkäisen kuormituspulssin muodostama kuormitusyksi (= ”akselin ylitys”) pystyttiin laitteistolla toteuttamaan koeolosuhteista riippuen 2.5–4 Hz taajuudella. Kuormitussuunta (= ”junan kulkusuunta”) vaihdettiin jokaisen sadan syklin jälkeen. Kokeiden kesto oli pääsääntöisesti joko 3 miljoonaa tai 6 miljoonaa sykliä, joten yhteen kokeeseen kuluva aika oli tavallisesti 12–25 vuorokautta. Käytettäessä 250 kN akselikuormaa vastaavaksi arvioitua kuormitustasoa 3 miljoonan syklin voidaan arvioida vastaavan noin 150 miljoonan tonnin junakuormitusta, kun oletetaan kirjallisuushavaintoihin (Nurmikolu, 2004) perustuen, että yksi kuormitusyksi vastaa jännitysten palautumattomuuden vuoksi kahta peräkkäistä 250 kN painoista akselia.



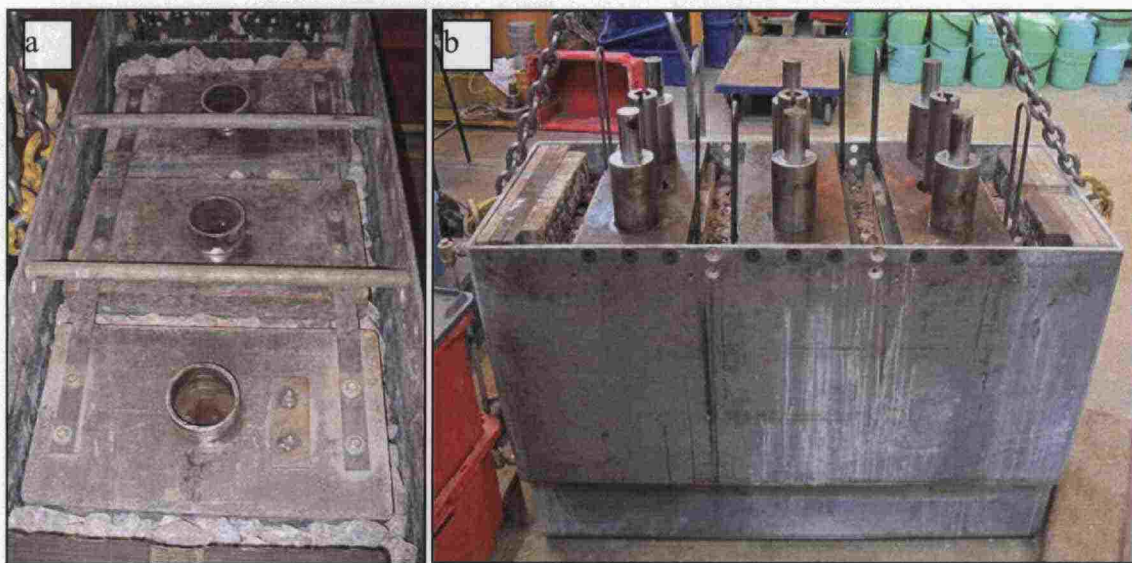
Kuva 3.13. Esimerkki toteutuneista kiviainekseen kohdistetuista kuormituspulsseista kahden kuormitusyklin ajanjaksolla, joka kuvan tapauksessa vastaa noin 660 ms, eli kuormitustaajuus esimerkissä on 3.0 Hz.

Koesarjoissa käytettävän kuormitustason valinta perustettiin kirjallisuudessa esitettyihin mittauksiin ja mallinnuksiin eri akselikuormilla ratarakenteen eri tasoilla vaikuttavista kuormitustasoista (Nurmikolu, 2004). Kirjallisuushavaintojen perusteella tukikerrokseen ja välikerrokseen kohdistuva kuormitustaso riippuu monesta tekijästä, mm. kiskojen ja ratapölkkyjen jäykkyydestä, pohjamaan joustavuudesta, kerrospaksuuksista ja rakennekerrosmateriaaleista. Tästä syystä rakenteen tietyllä tasolla tietyn akselikuorman seurauksena vaikuttavia kuormitustasoja ei voida yksikäsitteisesti esittää.

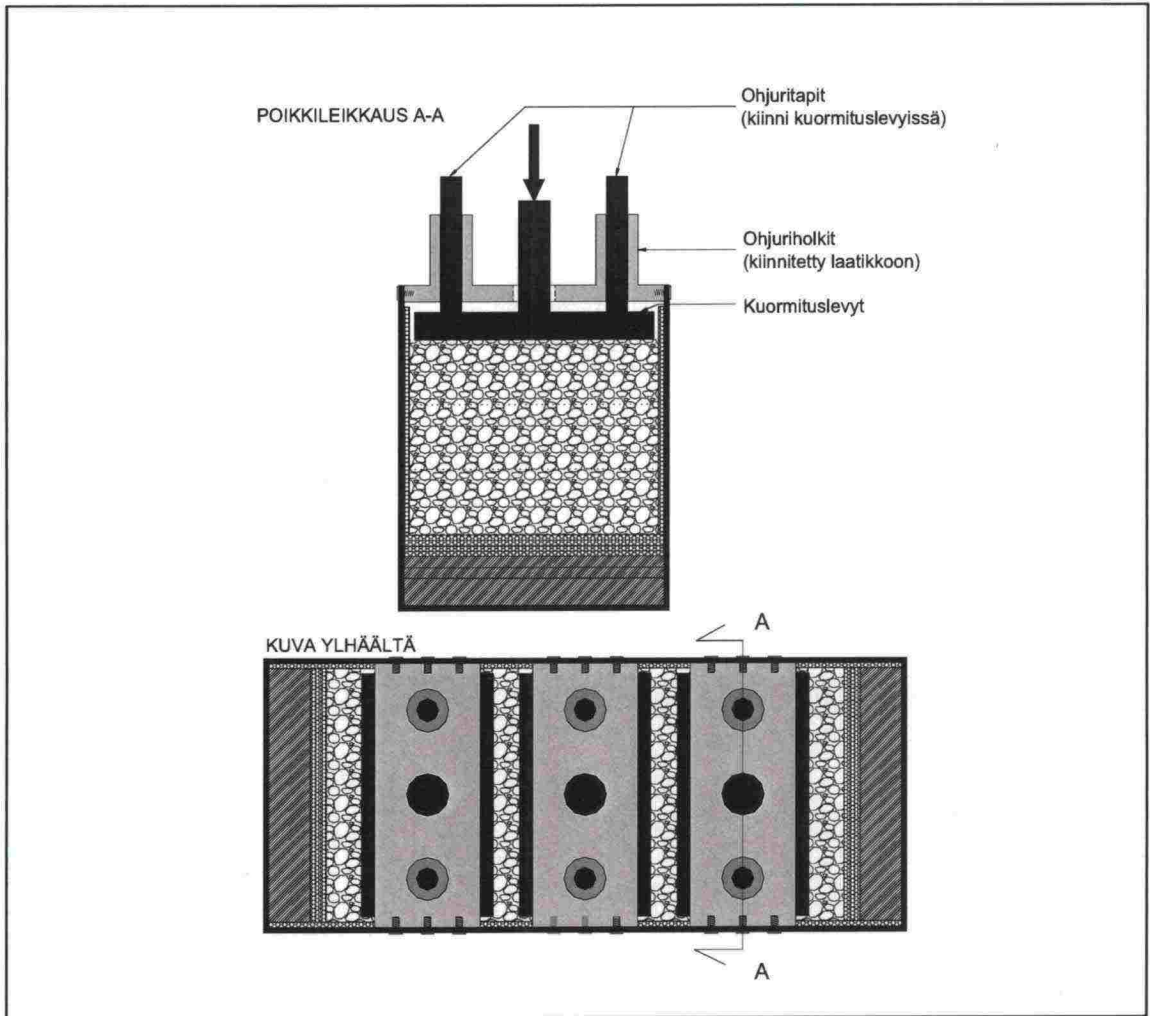
Koesarjoissa kuormitustasoina käytettiin 150, 225 ja 300 kPa, missä kuormitustasolla tarkoitetaan kuormituslevyjen alapinnalla kuormituspulssin aikana vaikuttavaa (eli kiviainekseen välittyvää) keskimääräistä pystysuuntaista jännitystä. Näistä 150 kPa arvioitiin vastaavan tavanomaisessa tapauksessa noin 250 kN akselikuormasta aiheutuvaa keskimääräistä kuormitusta välikerroksen yläpinnan tasolla, kun varaudutaan lievästi (sysäyskerroin ehkä noin 1.2–1.3) dynaamisen kuormitustekijään. Koska karkearakeisissa materiaaleissa jännitysten jakautuminen tapahtuu materiaalin partikkeliluonteesta johtuen epätasaisesti, välikerrokseen kohdistuu tukikerroksesta paikallisesti selvästi keskimääräistä kuormitustasoa suurempia kuormituksia. Tämän huomioimiseksi peruskuormitustasoksi kokeisiin valittiin 225 kPa, jossa on etenkin keskimääräistä välikerrokseen kohdistuvaa kuormitustasoa ajatellen selvästi varmuutta jopa 300 kN:n akselikuormituksen ja dynaamisen kuormitustekijän suhteen. Em. 225 kPa vastaa suuruusluokaltaan useissa mallinnuksissa 250 kN:n akselikuormasta tukikerrokseen kohdistuvaksi arvioitua keskimääräistä kvasistaattista kuormitusta. Suurin, 300 kPa:n kuormitus valittiin kuvastamaan suuruusluokaltaan 300 kN:n akselipainosta tukikerrokseen kohdistuvaa keskimääräistä kvasistaattista kuormitusta tai toisaalta 250 kN:n akselipainosta tukikerrokseen kohdistuvaa kuormitusta huomioiden

suuruudeltaan noin 1.3 sysäyskerroin. Kuormitustasot säädettiin halutuiksi ohjaamalla hydraulipumpun toimintaa jatkuvasti kokeen aikana tehtyjen voimamittausten perusteella.

Kuormituslevyjen kääntyilyn ja kiertymisen estämisessä käytettiin kahta eri järjestelyä. Yksinkertaisemmassa tapauksessa kuormituslevyjen kiertyminen estettiin ja kääntyilyä rajoitettiin sitomalla levyt toisiinsa kahden ohuen ja joustavan lattaraudan avulla kuvissa 3.11 ja 3.14a esitetyllä tavalla. Kyseinen tapa osoittautui ongelmalliseksi silloin, kun kuormituslevyjen painuminen oli suurta tai hyvin epätasaista. Toisessa vaihtoehdossa kuormituslevyihin kiinnitetyt ohjurimännät oli pakotettu liikkumaan laatikkoon kiinnitettyjen tarkkaan koneistettujen ohjuriholkkien sisässä (kuvat 3.15 ja 3.14b). Kosketuspintoja voideltiin kokeen kuluessa. Kyseinen järjestely esti tehokkaasti kuormituslevyjen ei-toivotut liikkeet, mutta kääntyilypyrkimysten myötä männien ja holkkien välillä voitelusta huolimatta lisääntynyt kitkavoima ”kulutti” kiviainekseen kohdistettavaa kuormitusta ja sen suuruuden arviointi oli vaikeaa (vrt. luku 6.2.3). Koejärjestelyn kehittämisen alkuvaiheessa käytettiin myös kapeampia, 150 mm leveitä kuormituslevyjä, joiden käytöstä kuitenkin luovuttiin nopeasti johtuen niiden voimakkaista kääntyily- ja kiertymispyrkimyksistä, jotka estivät pitkien koesarjojen tekemisen.



Kuva 3.14. Kuormituslevyjen kääntyilyn ja kiertymisen ehkäisemiseksi käytetyt sidelatta- (vas.) ja ohjurimäntäratkaisut (oik.).



Kuva 3.15. Vaihtoehtoinen ohjurimäntiin ja -holkkeihin perustuva järjestely kuormituslevyjen vääntyilyn ja kiertymisen ehkäisemiseksi.

3.4.2 Hienonemisen tarkkailu ja siirtymämittaukset

Toistokuormituskokeissa tarkasteltiin eri muuttujien vaikutusta kiviaineksen hienonemiseen ja siirtymäkäyttäytymiseen. Kiviainestekijöistä muuttujina koesarjoissa tarkasteltiin kiviaineksen raekokojakautumaa, hienorakeisen aineksen mukanaoloa ja kiviaineksen lujuutta. Olosuhdetekijöiksi luokiteltavia muuttujia koesarjoissa olivat pohjan joustavuus sekä vesi, jonka vaikutuksia arvioitiin sekä täysin kyllästyneessä että kosteassa materiaalissa, jossa haihtuminen estettiin kuormituslaatikon ympäröineellä muovikalvolla. Kuormitustasoa varioitiin edellisessä luvussa esitetyissä rajoissa. Tukikerrosta ajatellen myös raideseppelin tukemisen vaikutuksia tarkasteltiin. Yhteenveto tehdyistä kokeista on esitetty kokeiden tuloksia käsittelevässä luvun 6 taulukossa 6.1.

Kokeissa tarkkailtiin ensi sijassa materiaalin hienonemista. Tästä syystä laatikon materiaali seulottiin kokonaisuudessaan sekä ennen koetta että kokeen jälkeen. Toistokuormituskokeissa käytetyt kiviainekset seulottiin laboratoriomittakaavassa suuren kapasiteetin seulatäryttimessä (kuva 3.16). Seulojen koko oli $575 \times 375 \text{ mm}^2$ ja

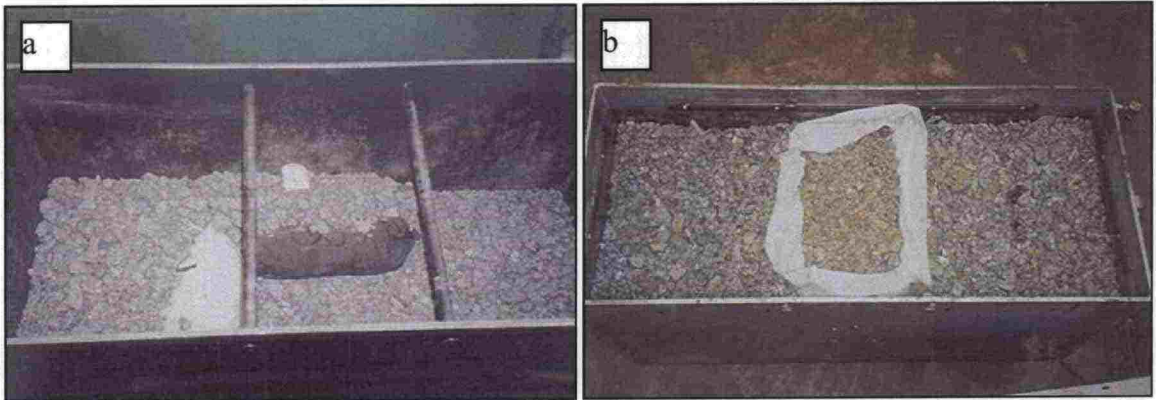
käytetty seulasarja 63, 50, 40, 31.5, 25, 16, 8 ja 4 mm. Käytetyt seulat olivat standardista (SFS-EN 933-2) poiketen kudottuja verkkoseuloja (ei neliöreikälevyjä). Raekooltaan alle 4 mm aines jaettiin näytteenjakajalla standardin SFS-EN 932-2 mukaisesti ja jaettu näyte seulottiin luvussa 3.1.1 esitetyn mukaisesti. Seulontojen jälkeen osa kustakin laitteesta pestiin vielä 0.063 mm seulalla rakeiden pinnoille kiinnittyneen hienoaineksen määrän selvittämiseksi, eli tuloksina ilmoitettavat rackokojakautumat ovat *pesuseulottuja* tuloksia. Yksittäiseen toistokuormituskokeeseen tarvittiin yleensä runsas 300 kg kiviainesta, joka seulottiin kokonaisuudessaan ennen koetta halutun rakeisuuden suhteistamiseksi ja kokeen jälkeen hienonemisen selvittämiseksi. Näin ollen käytetty seulamittakaava oli hyvän tarkkuuden mahdollistava, mutta toisaalta kapasiteetiltaan pienin mahdollinen kyseeseen tuleva. Käytetyllä täryttimellä seulottiin projektin yhteydessä noin 25 000 kiloa kallio-mursketta.



Kuva 3.16. Toistokuormituskoemateriaalien suhteistamiseksi ja kokeissa tapahtuneen hienonemisen tarkastelemiseksi käytetty suuren kapasiteetin seulatärytin.

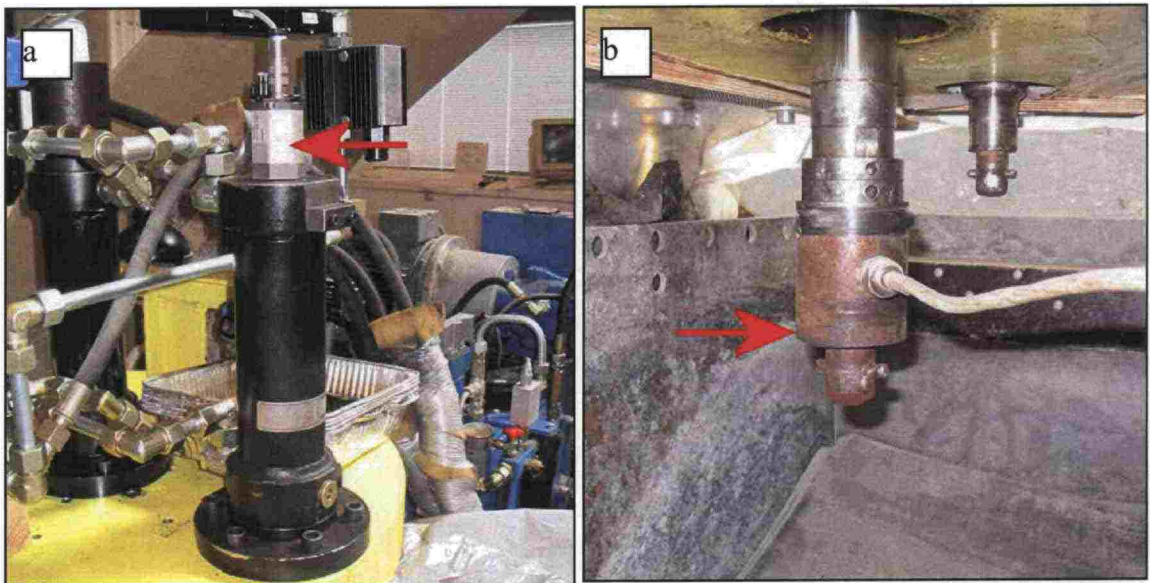
Hienonemisen tarkkailussa testattiin koejärjestelyn kehitysvaiheessa sekä koestuslaatikon eri paikkoihin sijoitettuja näytepusseja (kuva 3.17a) että laatikon osioihin jakavia verkkokangaspusseja (kuva 3.17b). Erottelulla pyrittiin mahdollistamaan laatikon eri osissa tapahtuvan hienonemisen tarkastelu ja pienentämään tarvittavia seulontamääriä. Pienten kangaspussien osalta rajoitteeksi havaittiin niiden mahdollistama kiviaineksen lajittuminen asennusvaiheessa, kun aineksen sekoittuneisuutta ei ole mahdollista havainnoida. Toisaalta ongelmaksi olisi märkä-kokeissa muodostunut veden vapaan kulun häiriytymisen. Lisäksi kangaspussit aiheuttivat helpomman liukuman ja leikkautumisen mahdollistavia epäjatkuvuuskohtia kiviainekseen. Verkkokangaspussi mahdollisti veden vapaan liikkumisen, mutta sen havaittiin hyvin yllättävällä tavalla vaikuttavan ratkaisevasti partikkelien välisen

leikkaantumispinnan muodostumiseen ja siten vääristävän oleellisesti kiviaineksen käyttäytymistä. Asiaa on käsitelty tarkemmin tulosten yhteydessä luvussa 6.2.1.



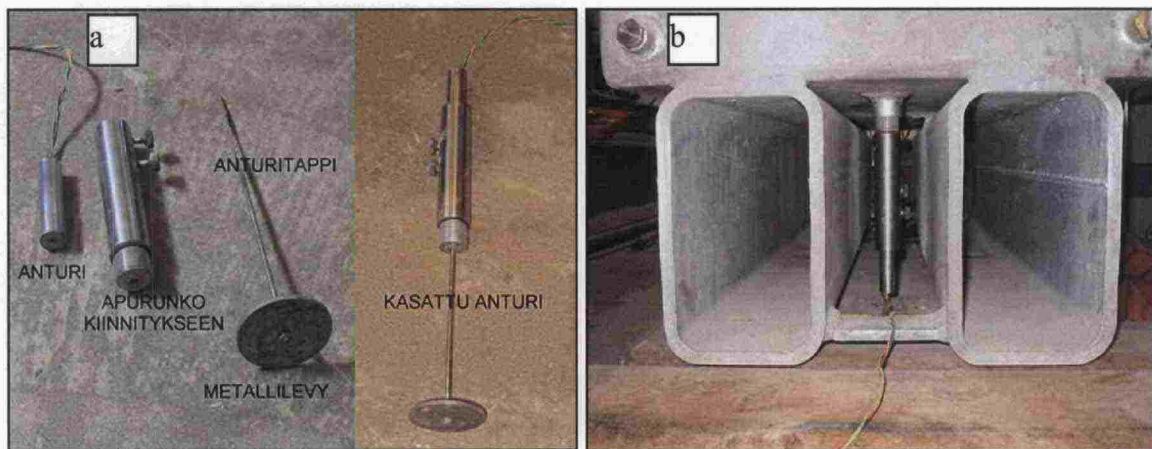
Kuva 3.17. Hienonemisen tarkkailussa testattuja kiviaineksen rajaamisratkaisuja, jotka todettiin tarkoitukseen epäsopiviksi. Vasemmalla eri osiin laatikkoa sijoitettuja pieniä kangaspusseja ja oikealla laatikon keskiosan materiaalin erottamiseksi käytetty verkkokangaspussi.

Hienonemisen lisäksi kokeissa mitattiin kuormitussylintereihin sisäänrakennetuilla, hydraulimäntien liikkeitä seuraavilla Balluff Micropulse -siirtymäantureilla (kuva 3.18a) kuormituslevyjen painuman kehittymistä sekä yksittäisen kuormituspulssin aikana tapahtuvaa kiviaineksen ja pohjakumin kimmoista muodonmuutosta. Hydraulisylintereiden kuormituslevyihin kohdistamaa voimaa mitattiin sylintereiden alapäähän sijoitetuilla voima-antureilla (ks. kuva 3.18b). Voimamittausten perusteella ohjattiin kokeen kuluessa hydraulipumpun toimintaa halutun kuormitustason säilyttämiseksi.



Kuva 3.18. Kuormitussylintereihin asennetut kiinteät siirtymäanturit (vas.) ja voima-anturit.(oik.).

Kuormituksen jakaantumisen ja pohjan joustokäyttäytymisen arvioimiseksi osassa kokeista mitattiin pysyviä ja palautuvia muodonmuutoksia myös materiaalin eri korkeustasoille ja pohjakumiin asennetuilla siirtymäantureilla tyypiltään Hewlett Packard 7DCDT-250 (ks. kuva 3.19). Antureiden rungot kiinnitettiin laatikon pohjan alapuolelle (kuva 3.19b). Runkojen sisässä liikkuvat tangot (ks. kuva 3.19a) kulkivat pohjan muovi- ja kumilevyihin (vrt. kuva 3.11) poratuissa rei'issä halutulle mittaustasolle saakka. Pohjakumin jouston mittaamiseen käytetyn anturin tanko kiinnitettiin pohjakumin päällä olevaan peltilevyyn, jolloin tanko seurasi peltilevyn liikkeitä. Anturin toiminta perustui tangon alapään asemaan rungon sisällä. Tangon tietyn suuruinen siirtyminen aiheutti tietyn suuruisen sähkömagneettisen kentän muutoksen. Siirtymiä tarkasteltiin myös kiviaineksen seasta ulottamalla anturin tanko pohjakumia ylemmäs. Kiviaines asennettiin ja tiivistettiin tavalliseen tapaan halutulle (pohja+120 mm tai pohja+240 mm) tasolle. Tämän jälkeen anturin tangon päähän kiinnitettiin halkaisijaltaan 60 mm metallilevy, jolloin tanko seurasi metallilevyn liikkeitä.



Kuva 3.19. Kiviaineksen ja pohjakumin siirtymien mittaukseen käytetty anturi apuosineen ja koottuna (vas.) sekä laatikon pohjaan paikoilleen kiinnitettynä (oik.).

3.4.3 Tutkimukset toistokuormituskokeiden materiaaleille

Sykliisissä toistokuormituskokeissa käytettyjen (ks. taulukko 2.4) kalliomurskeiden lujuus- ja muoto-ominaisuuksia tarkasteltiin useassa standardoidussa laboratorio-kokeessa. Lujuustutkimukset tehtiin sekä käytöstä poistumassa olevilla haurausarvo- ja kuulamylymenetelmillä (VR, 1995) että uusilla micro-Deval (SFS-EN 1097-1) ja Los Angeles (SFS-EN 1097-2) -menetelmillä. Kuulamyly- ja micro-Deval-kokeissa testataan lähinnä kiviaineksen hioutuvuutta (kovuutta). Vastaavasti haurausarvokokeen tulokset ilmentävät kokeen nimen mukaisesti kiviaineksen iskunkestävyyttä (sitkeyttä). Los Angeles-kokeen tulokset kuvaavat pääosin kiviaineksen iskunkestävyyttä, mutta rumpukokeille tyypillisesti pienessä määrin myös hioutuvuutta.

Haurausarvo- ja kuulamylykokeiden yhteydessä määritettiin kokeissa käytetyistä laitteista rakeiden *pitkulaisuus* ja *liuskeisuus*. Pitkulaisuudella (SFS-EN 933-4) tarkoitetaan rakeiden suurimman (c) ja pienimmän (a) dimension suhdetta (c/a). Liuskeisuudella tarkoitetaan vastaavasti keskimmäisen (b) ja pienimmän dimension suhdetta (b/a). *Muotoarvo* (SFS-EN 933-4) määräytyy pitkulaisten rakeiden prosentuaalisena osuutena kiviaineksessa. Joidenkin kiviainesten muotoa tarkasteltiin

litteyslukumäärityksissä (SFS-EN 933-3). Litteysluku kuvastaa litteiden rakeiden prosentuaalista osuutta kiviainestuotteessa.

Toistokuormituskokeiden materiaaleille tehtiin kallioperägeologin toimesta ohuthietutkimuksiin ja silmämääräisiin tarkasteluihin perustuvat petrografiset arvioinnit (vrt. luku 3.1.4). Petrograsten tarkastelujen lausunnot sekä lujuus- ja muototutkimusten tulokset on esitetty liitteessä 3.

Mainittujen tutkimusten lisäksi myös toistokuormituskokeissa käytetyille murskeille tehtiin luvuissa 3.1 ja 3.2 esitetyt tutkimukset karkeiden rakeiden ja hienoaineksen ominaisuuksista. Samaten routanousukokeissa tarkasteltiin myös toistokuormituskokeissa käytettyjä uusia kalliomurskeita

4 TUKIKERROSNÄYTTEET JA NIIDEN HIENOAINES

4.1 Yleistä

Näytteenottoon perustuvat raideseppelin hienonemistutkimukset ovat tähän saakka rajoittuneet suurelta osin ainoastaan hienontuneiden kiviainesten raekokojakautuman määrittämiseen. Tästä lähtökohdasta on mahdotonta arvioida eri tekijöiden merkittävyyttä kiviaineksen hienonemisessa. Näin ollen luonnollisesti myöskään tutkimustuloksia hienonemisessa syntyvän hienoaineksen laadusta ja sen vaikutuksesta kiviaineksen toimintakykyyn ei ole.

Tämän tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin aidossa ratarakenneympäristössä vuosikymmenten kuluessa tapahtuvaa raideseppelin hienonemista erityisesti syntyneen hienoaineksen laadun arvioimiseksi tehtyjen laajamittaisten laboratoriokoesarjojen avulla. Maantieteellisesti rataverkon eri puolille hajautetulla näytteenotolla pyrittiin kattamaan mahdollisimman laaja otanta tyypillisesti käytettyjä raideseppelikiviaineksia, jotta pystyttäisiin esittämään hienonemismekanismeja yleisellä tasolla koskevia päätelmiä. Hienonemista aiheuttavien eri tekijöiden merkittävyyden hahmottamiseksi mielenkiinnon kohteena olivat erityisesti mahdolliset merkit kiviaineksen kemiallisesta muuttumisesta tai muusta ympäristörasituksen aiheuttamasta hienonemisesta. Pitkään radassa olleiden raideseppeliainesten arvioitiin olevan käytettävissä olevista paras, joskin silti vain suuntaa-antava lähestymistapa myös ajatellen ympäristörasitusten mahdollista hienontavaa vaikutusta eristys- ja välikerrosten kalliomurskeisiin.

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan raideseppelinäytteille ja niiden hienoaineksille tehtyjen laboratoriokokeiden tuloksia. Vertailupohjan saavuttamiseksi tulosten rinnalla tarkastellaan joillekin sorille ja hiekoille, käyttämättömille kalliomurskeille sekä muille vertailumateriaaleille tehtyjen kokeiden tuloksia. Vertailu soriin ja hiekkoihin on mielekästä erityisesti ajatellen eristys- ja välikerrosten materiaaleja. Näytteenottokohteet ja tutkitut materiaalit on esitetty luvussa 2.

4.2 Rakeisuus

4.2.1 Raekokojakautuma ja hienorakeisen aineksen määrä tukikerroksessa

Raideseppelin laadun tutkimusohjeen mukaisesti otettujen hienontuneiden raideseppelinäytteiden kuivaseulotut rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 1 samoin kuin luonnollisten vertailumaalajien pesuseulotut rakeisuuskäyrät. Aiemman tutkimuksen yhteydessä otettujen tukikerroksinäytteiden rakeisuustiedot on raportoitu aiemmassa julkaisussa (Nurmikolu, 2000), jossa on tarkasteltu myös Ratahallintokeskuksen toimeenpanema 1990-luvun jälkipuolella määritettyjä tukikerrosten rakeisuustietoja rataosakohtaisesti.

Raideseppelinäytteistä 1 mm, 8 mm ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summana lasketut rakeisuusluvut on esitetty taulukossa 4.1 yhdessä kuivaseulonnassa saatujen hienoainesmäärien (<0.063 mm) ja niiden kokojakautumien kanssa. Eri läpäisyprosenttien keskinäisiä suhteita tarkastellaan seuraavassa luvussa 4.2.2. Luonnollisten vertailumaalajien sekä käyttämättömien, vastamurskattujen kalliomurskeiden hienoainesten raekotiedot on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.1. Tukikerrosnäytteiden rakeisuustiedot.

Näyte	Rakei- suus- luku	Läpäisyprosentit kuivaseulonnassa				<0.063 mm aineksesta (%)	
		<25 mm	<8 mm	<1 mm	<0.06 3 mm	<0.02 mm	<0.002 mm
Iis-Yvk 586+400	37	23.2	8.8	5.4	1.7	49	10
Iis-Yvk 664+600	71	50.7	13.4	6.9	1.8	49	9
Kok-Oul 573+375	89	57.4	21.8	9.8	2.4	53	13
Kok-Oul 624+810	76	49.8	18.2	7.7	1.8	49	11
Kok-Oul 653+700	56	35.3	14.6	6.6	1.6	53	11
Kok-Oul 699+990	43	28.6	9.4	5.1	1.3	52	11
Kuo-Iis 495+780	81	44.8	23.4	13.0	2.4	49	12
Kuo-Iis 518+837	77	53.0	16.1	8.3	2.3	45	8
Kuo-Iis 538+720	50	34.1	9.6	5.9	1.7	49	11
Säk-Joe 598+000	95	59.5	24.5	10.7	3.5	42	10
Tku-Tjl 233+910	82	49.5	22.5	10.4	2.5	53	12
Tku-Tjl 248+300	101	59.9	28.8	12.5	2.6	52	13
Tku-Tjl 260+300	84	51.8	22.5	10.0	2.1	57	13
Tmj-Raa 703+170	18	12.6	2.9	2.2	0.7	46	8
Tmj-Raa 714+600	94	53.8	25.6	14.2	2.9	52	8
Vii-Sii 541+920	49	31.1	11.4	6.1	2.0	52	8
Vii-Sii 577+000	124	77.6	31.2	14.7	3.6	53	11
Vii-Sii 663+830	39	28.6	7.0	3.9	1.8	52	11
Jmk-Jyv 288+400	110	62.0	33.0	15.4	2.9	58	9
Jmk-Jyv 314+610	85	50.7	23.4	10.8	2.9	60	11
Kvl-Luu/E 30+780	65	49.4	10.8	4.6	1.0	69	17
Kvl-Luu/P 23+830	49	32.1	13.0	4.2	1.4	59	14
Kvl-Luu/P 31+880	39	31.5	5.4	2.2	0.8	60	13
Sjk-Kok 449+000						58	12
Sjk-Kok 480+000						58	12
Sjk-Kok 506+000						55	10
Tpe-Orv/E 94+510	98	60.0	26.5	11.0	2.0	61	11
Tpe-Orv/E 14+030	103	62.3	29.4	11.1	2.4	60	10
Tpe-Orv/E 94+080 Tod.	93	54.2	26.6	12.1	3.1	75	18
Tor-Kol 999+300						54	9
Kon-Var 680&710						57	13
Pmk-Kuo 402+470						56	11
Tor-Kol 920+180 Kuiv						66	13
Tor-Kol 920+180 Pesu						91	16
Tor-Kol 920+180 Tod.						77	14
Lau-Rov 866+250 Kuiv						55	12
Lau-Rov 866+250 Pesu						82	23
Lau-Rov 866+250 Tod.						63	15
Oul-Lau 806+250 Kuiv						62	12
Oul-Lau 806+250 Pesu						90	14
Oul-Lau 806+250 Tod.						66	12
Oul-Lau 756+150 Kuiv						58	9
Oul-Lau 756+150 Pesu						85	14
Oul-Lau 756+150 Tod.						67	11

Kuiv = kuivaseulonnassa saatu hienoaines (normaalitapaus, kaikki ne joissa ei muuta merkintää), Pesu = seulonnan jälkeisessä pesussa vielä irronnut hienoaines,

Tod. = hienoaines näytteessä keskimäärin

Taulukko 4.2. Vertailunäytteiden ja uusien kalliomurskeiden hienoainesten raekokotiedot.

Näyte	Pesuseulottu hieno- ainespitoisuus (%)	Hienoaineksesta (%)	
		<0.02 mm	<0.002 mm
Kon-Tai km 665, raidesora	1.8	34	7
Orv-Jmk 248+120, välikerros	2.3	45	10
Kon-Var 710+880, välikerros	1.9	33	4
Oul-Kon km 849, välikerros	0.3	25	
Pmk-Kuo 402+470, välikerros	1.3	17	2
Kankaanpää, hiekka	Kuiv.	22	4
Kankaanpää, hiekka	Pesu 21.3	95	4
Kankaanpää, hiekka	Tod.	24	4
Vesanka, hiekka	Kuiv.	52	18
Vesanka, hiekka	Tod. 5.2	74	32
Vesilahti, sora	Kuiv. 3.7	64	21
km 50+700, uusi murske		53	12
km 85+600, uusi murske		46	9
km 87+500, uusi murske		57	10
km 88+200, uusi murske		45	5
Lakalaiva, uusi murske		49	9

Kuiv. = kuivaseulonnassa saatu hienoaines, (normaalitapaus, kaikki ne joissa ei muuta merkintää),

Pesu = seulonnan jälkeisessä pesussa vielä irronnut hienoaines,

Tod. = hienoaines näytteessä keskimäärin

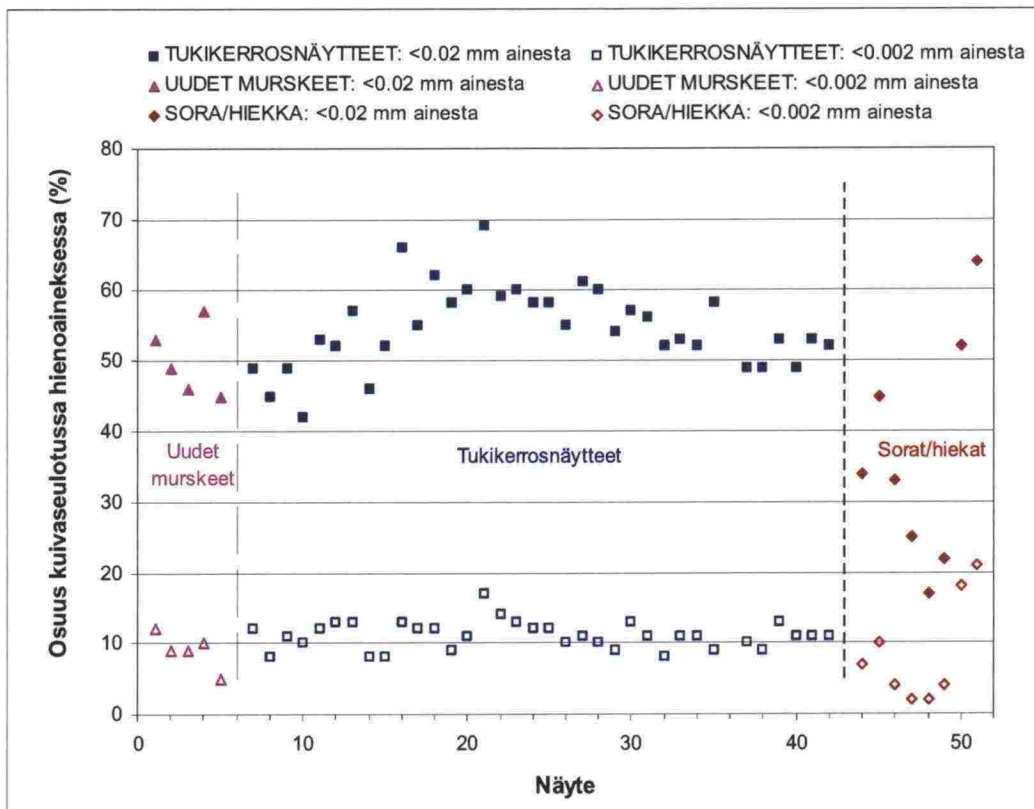
Taulukosta 4.1 voidaan havaita, että hienoaineksen sisällä raekokojakautuma oli kaikissa raidesepelinäytteissä melko samantyyppinen (ks. kuva 4.1). Alle 0.02 mm lajitteen osuudet kuivaseulonnassa irronneista hienoaineksista olivat miltei poikkeuksetta välillä 45–60 % keskiarvon ollessa 55 %. Kuivaseulonnassa irronneiden hienoainesten savespitoisuudet (alle 0.002 mm lajitteen osuudet) olivat vastaavasti verraten alhaisia, keskimäärin 11 %. Koska hienoaineksen osuus koko tukikerrosnäytteestä on yleensä alle viiden prosentin luokkaa, kaikkein hienoimpia partikkeleja on raidesepelin hienoaineksessa varsin vähän. Näin ollen yleisessä tapauksessa alle 0.02 mm lajitteen ja savespitoisuuden määrät ja niiden vaihtelut tukikerrosnäytteissä tulevat huomioiduksi hienoainespitoisuuksien vertailussa.

Tukikerroksesta otettujen näytteiden hienoainesten kokojakautumat olivat hyvin lähellä kiviaineksen tuotannossa syntyneiden uusien kalliomurskeiden hienoainesten kokojakautumia (kuva 4.1). Tämä viestii siitä, että uuden kalliomurskeen sisältämä hienoaines ei yleisessä tapauksessa entisestään hienone merkittävästi rakenteessa. Koska nimenomaan materiaalin hienoaines on suuren raepinta-alansa johdosta altteinta kemialliselle rapautumiselle, havainto viittaa siihen, että kemiallinen rapautuminen ei ole ollut merkittävä tekijä tukikerrosnäytteiden hienonemisessa. Voimakkaan kemiallisen rapautumisen voisi arvioida ilmenevän kaikkein hienoimpien lajitteiden osuuden, ennen muuta savespitoisuuden lisääntymisenä hienoaineksessa.

Hienoaineksen (<0.063 mm) tarkan määrän määrittämiseksi tukikerrosnäytteet tulisi kuitenkin pesuseuloa, sillä joissakin tapauksissa huomattava osa hienoaineksesta säilyy kuivaseulonnassa karkeampien rakeiden pinnoille kiinnittyneenä. Taulukossa 4.3 on

esitetty joistakin erityistarkasteluun otetuista näytteistä tehdyt havainnot hienoaineksen irtoamisesta kuivaseulonnassa. Vasta pesussa irronneen hienoaineksen määrä vaihteli voimakkaasti eri kiviaineksissa ilmentäen hienoaineksen kiinnittymistavan ja -voimakkuuden vaihteluja. Hienorakeisen aineksen kokonaismäärällä ei havaittu yhteyttä vasta kuivaseulonnan jälkeisessä pesussa irronneen hienoaineksen määrään.

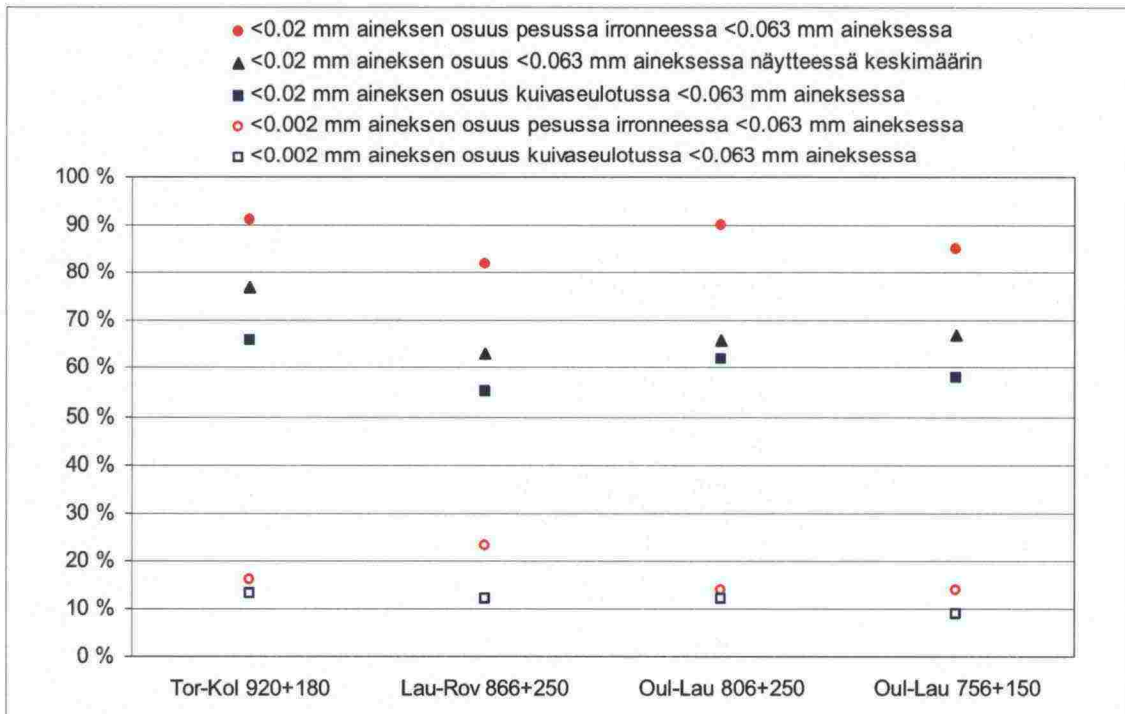
Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa vasta seulonnan jälkeen pesussa irronnut hienoaines oli partikkelikooltaan kuivaseulonnassa irronnutta hienoainesta jonkin verran pienempää, kuten kuvasta 4.2 nähdään. Tarkastelluissa neljässä tukikerrosnäytteessä kuivaseulonnassa saaduissa hienoaineksissa partikkelikooltaan alle 0.02 mm aineksen osuus oli keskimäärin 60 % ja pesussa irronneissa hienoaineksissa vastaavasti 87 %. Alle 0.002 mm aineksen osuudet olivat vastaavasti 11 % ja 17 %. Eri tavoilla irronneiden hienoainesten määrät huomioiden alle 0.02 mm aineksen osuus näytteiden hienoaineksissa oli keskimäärin 8 prosenttiyksikköä suurempi, kun tarkastelussa huomioitiin kuivaseulonnassa saadun hienoaineksen lisäksi vasta pesussa irronnut hienoaines. Pinnoille kiinnittyneen hienoaineksen talteenoton vaikeuden vuoksi hienoainesten tarkemmissa tutkimuksissa jouduttiin keskittymään pääosin kuivaseulonnassa irronneen hienoaineksen tarkasteluun. Tästä syystä hienoainesanalyyysien tulokset eivät tarkkaan ottaen kuvasta täysin kiviaineksen todellisen hienoaineksen ominaisuuksia silloin, kun karkeampien rakeiden pinnoille tarttuneen, analyyysien ulkopuolelle jääneen hienoaineksen osuus hienoaineksen kokonaismäärästä on suuri ja sen laatu poikkeaa kuivaseulonnassa irronneen hienoaineksen laadusta.



Kuva 4.1. Partikkelikooltaan alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm ainesten osuudet raidesepelinäytteiden, uusien murskeiden ja luonnollisten vertailumaalajien kuivaseulonnassa irronneissa hienoaineksissa (<0.063 mm).

Taulukko 4.3. Kuivaseulonnassa ja sen jälkeen tehdyssä pesussa irronneiden hienoainesten osuudet kokonaishienoainesmääristä.

	Hienoaineksesta irtosi	
	kuivaseulonnassa (%)	kuivaseulonnan jälkeisessä pesussa (%)
Tor-Kol 999+300	80	20
Tor-Kol 920+180	56	44
Lau-Rov 866+250	69	31
Kon-Var 680&710	90	10
Pmk-Kuo 402+470	90	10
Oul-Lau 806+250	85	15
Oul-Lau 756+150	68	32
Kvl-Luu /E 230+780	60	40
Kvl-Luu /P 223+830	92	8
Kvl-Luu /P 231+880	92	8
Sjk-Kok 449+000	76	24
Sjk-Kok 480+000	70	30
Sjk-Kok 506+000	82	18
Tpe-Orv /E 194+510	82	18
Tpe-Orv /E 214+030	93	7
Vesilahti, hiekka	63	37
Vesanka, sora	31	69
Kankaanpää, hiekka	96	4
Orv-Jmk 248+120, välikerros	73	27
Kon-Var 710+880, välikerros	82	18
Pmk-Kuo 402+470, välikerros	85	15
Kon-Tai 665+xxx, raidesora	93	7



Kuva 4.2. Partikkelikooltaan alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm ainesten osuudet kuivaseulonnassa ja sitä seuranneessa pesussa irronneissa hienoaineksissa (<0.063 mm).

Kuvasta 4.1 on syytä huomioda luonnollisilla maalajeilla hienoainesten partikkelikokojakautumisissa kalliomurskenäytteistä poiketen esiintyvä huomattavan suuri hajonta. Esimerkiksi Vesilahden ja Vesangan materiaaleissa hienoaineksen savespitoisuus oli verraten suuri. Hajonta on luonnollinen seuraus siitä, että hienoainespitoisuus määräytyy kerrostuneen materiaalin lähtöaineksen, kulkeutumisen ja kerrostumisolosuhteiden sekä niiden jälkeisen mahdollisen rapautumisen perusteella. On selvää, että näiden geologisten tekijöiden vaihteluun verrattuna kalliomurskeen tuotantoprosessin vaihtelu ja sen vaikutukset syntyvien hienoainesten raekokojakautumiin ovat vähäisiä.

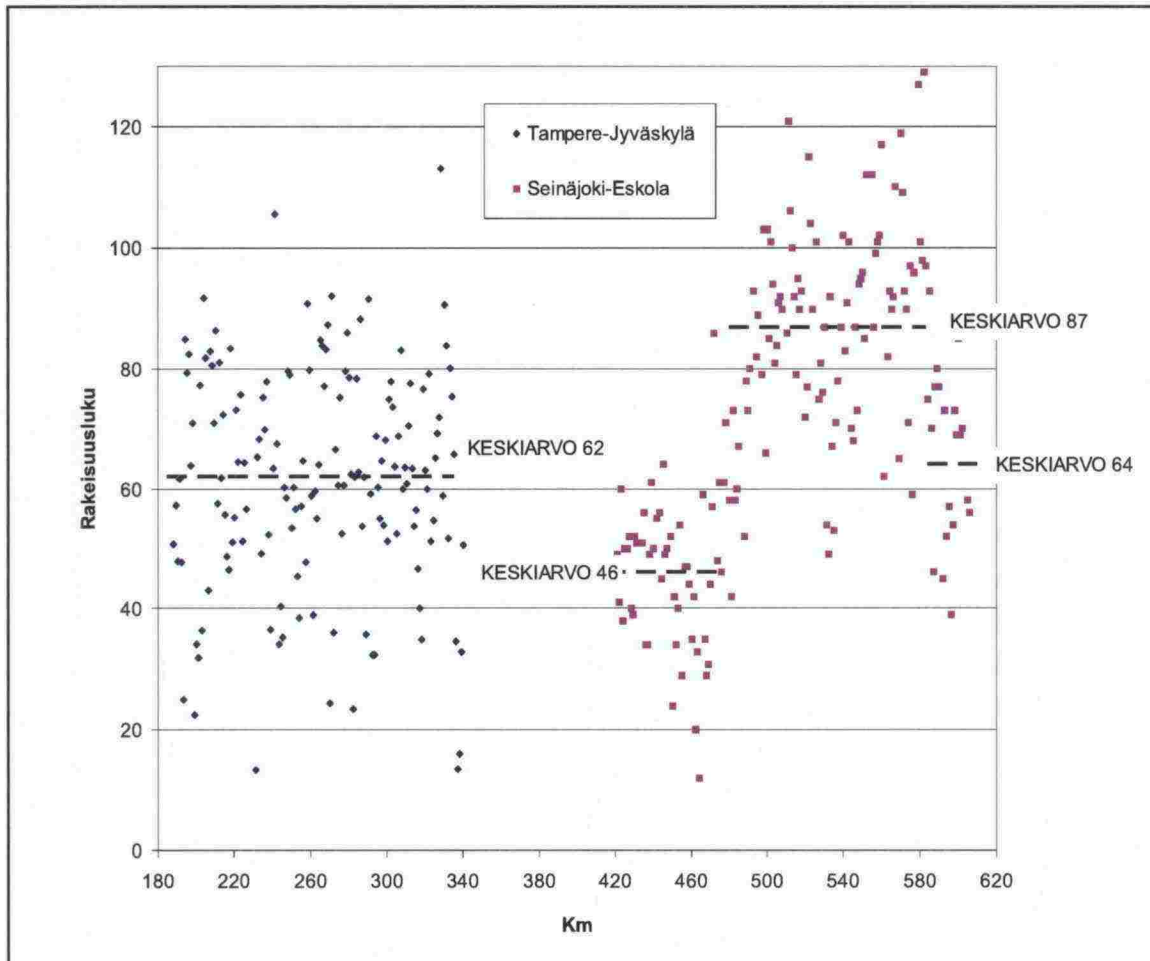
Ratojen alusrakennekerrokset on pääosin rakennettu vuosikymmeniä sitten. Tuolloisen tietämyksen perusteella miltei kaikkia sora- ja hiekkamateriaaleja on saatettu esimerkiksi routimisherkkyyden tai vedensitomisominaisuuksien suhteen pitää automaattisesti rakennekerrosmateriaaleiksi sopivina, mitä ne myöhemmin luvussa 5 raportoitavien tulosten perusteella eivät välttämättä ole. Toisaalta liikennöintinopeuksien ja akselipainojen korottamisen myötä tiukentuneet tasaisuusvaatimukset ovat osaltaan kiristäneet myös alusrakennekerrosten materiaaleihin kohdistuvia vaatimuksia. Tekijöiden yhteisvaikutus mahdollisen puutteellisen kuivatuksen kanssa tekee mahdolliseksi sen, että rataverkolla on osuuksia, joissa routimisoireita selittävänä tekijänä onkin routimisherkkä alusrakennemateriaali, eikä niinkään roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan. Tällöin routimishaittoja on tehotonta pyrkiä vähentämään tukikerroksen puhdistamisella tai rakennekerrosten paksuutta lisäämällä. Routimisongelmista kärsivillä osuuksilla alusrakennekerrosmateriaalien routivuus- ja vedensitomisominaisuuksien tarkastelua ei tule sulkea pois.

Tarkasteltaessa hienoaineksen kokonaismääriä tukikerrosnäytteissä on syytä huomata karkea- ja tasarakeisuuden mahdollistaman materiaalin sisäisen lajittumisen vaikutus. Karkeiden sepelirakeiden välisissä huokostiloissa hienoainespitoisuus on paikallisesti huomattavasti suurempi kuin näytteestä määritetty keskimääräinen hienoainespitoisuus. Tästä syystä tietty hienoainespitoisuus voidaan arvioida kivisessä materiaalissa esimerkiksi routimisherkkyyden kannalta haitallisemmaksi verrattuna vastaavan määrän hienoainesta sisältävään homogeenisempaan materiaaliin.

4.2.2 Tukikerroksen toimintakunnan arviointi rakeisuustutkimuksen perusteella

Ratahallintokeskuksen toimeenpanemana tehtiin sepelinpuhdistustarpeen arvioimiseksi 1990-luvun loppupuolella laajamittaista rakeisuuslukututkimusta eri rataosilla (Nurmikolu, 2000). Tuloksia tarkasteltaessa rakeisuusluvun voitiin havaita vaihtelevan esimerkikikuvan 4.3 mukaisesti tietyn rataosan sisällä hyvin voimakkaasti vaikkapa peräkkäisiltä kilometreiltä, samasta raidesepelikiviaineksesta koostuvasta tukikerroksesta otettujen näytteiden välillä. Näytteenottomenetelmän on havaittu olevan hyvin arka näytteenottotason vaihteluille. Toisaalta hyvin huolellisesti tehtyyn näytteenottoon perustuen vierekkäisistä ratapölkkyväleistä määritettyjen rakeisuuslukujen keskimääräiseksi keskivirheeksi on arvioitu (Nurmikolu, 2000) vain 4.4 yksikköä, mistä syystä kuvan 4.3 esimerkin mukaisen rakeisuusluvun vaihtelun ei voida olettaa selittyvän satunnaisuudella. Vaihtelu on osoitus siitä, että raidesepelin hienonemisessa on sepelilaadun ohella muita merkittävästi vaikuttavia tekijöitä. Vaihtelua selittävien tekijöiden selvittämiseksi tulisi tehdä lisätutkimuksia, joiden avulla pyritään havainnoimaan osuuden keskimääräiseen hienonemiseen nähden voimakkaan ja

vastaavasti vähäisen hienonemisen syntyyn vaikuttaneita rakenteellisia tekijöitä. Raidesepelin materiaalivaatimusten kiristäminen on rajallinen ja taloudellisesti huono keino hienonemisen ehkäisemisessä, mikäli perimmäiset poikkeuksellista hienonemista aiheuttavat syyt ovat rakenteellisia.



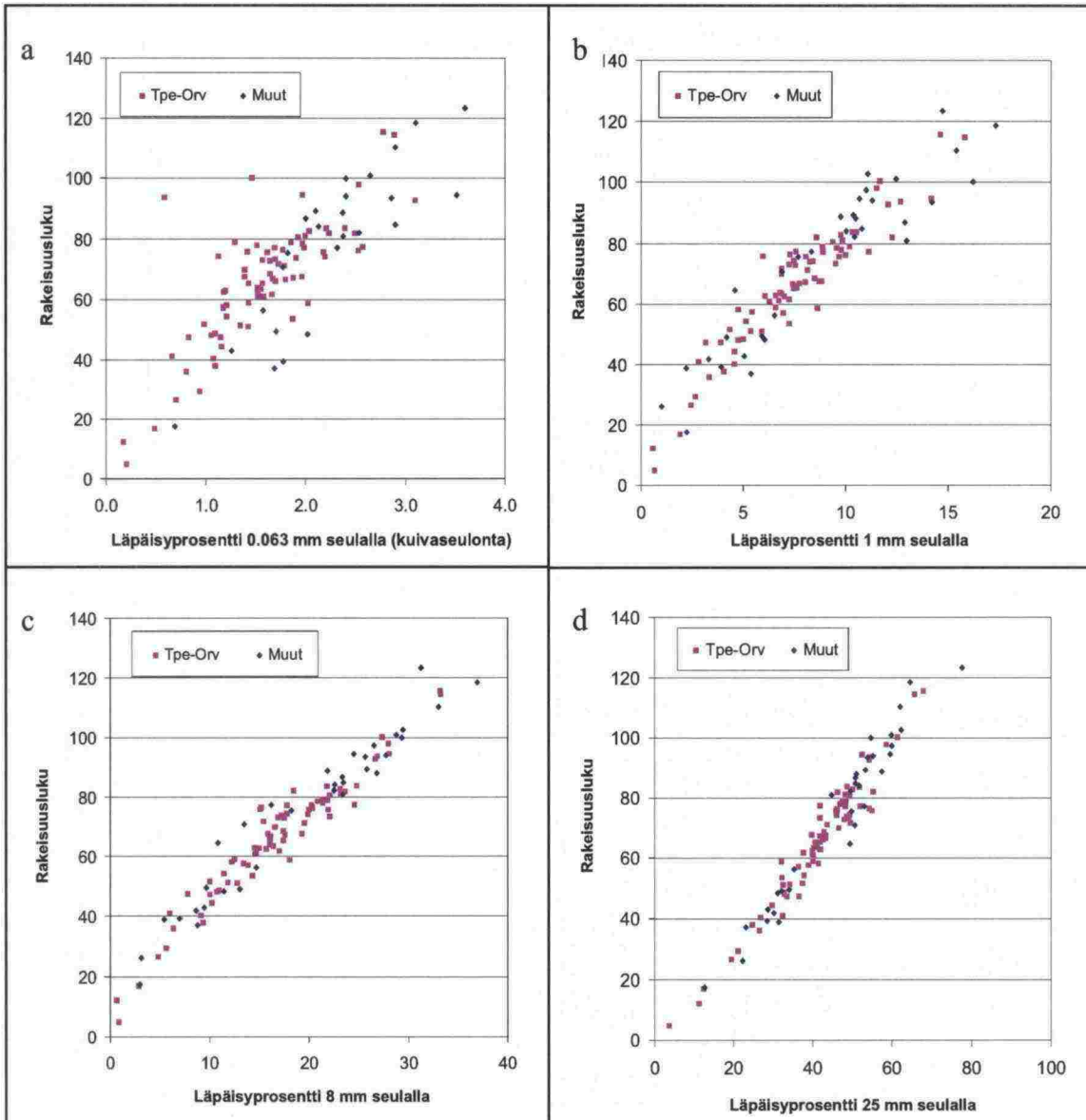
Kuva 4.3. Esimerkki rakeisuusluvun voimakkaasta vaihtelusta tietyn rataosan sisällä ja tukikerroksen keskimääräisen kunnon arvioinnista rataosilla Tampere-Jyväskylä (km 187–341, näytteenottovuosi 1996) ja Seinäjoki-Eskola (km 418–606, näytteenottovuosi 1995).

Em. vaihtelun vuoksi noin kilometrin välein otettujen raidesepelinäytteiden perusteella voidaan käytännössä arvioida ainoastaan raidesepelin hienontuneisuutta rataosalla keskimäärin. Tietyn rataosan tukikerroksen hienontuneisuuden tarkastelussa oiiva työväline on kuvan 4.3 mukainen rakeisuuslukujen esitystapa, josta voidaan arvioida ovatko rakeisuusluvut koko tarkastellulla rataosalla em. tasaisen vaihtelun puitteissa. Esimerkin mukaisella Sjk-Esk-rataosalla on kuvasta tulkittavissa kolme selvästi eri tasolle hienontuneutta tukikerrososuutta, mitä sepelikiviaineksen lujuuseron on havaittu ainakin osittain selittävän (Nurmikolu, 2000). Saatua tietoa on hyödynnetty sepelikiviaineksen hankintamenettelyssä, kun on arvioitu kiviaineksen lujuuden vaikutusta tukikerroksen kestoikään ja siten elinkaarikustannuksiin. Kuvassa esitetty tarkastelu mahdollistaa hienontuneimpien osaosuuksien havaitsemisen ja niiden priorisoinnin mahdollisesti usealle vuodelle jaksottuvassa sepelinseulonnessa. Luonnollisesti näytevälin tihentäminen parantaa osaosuuksien jaottelumahdollisuuksia

ja toisaalta mahdollisten hienonemista kiihdyttävien rakenteellisten tekijöiden havainnointia.

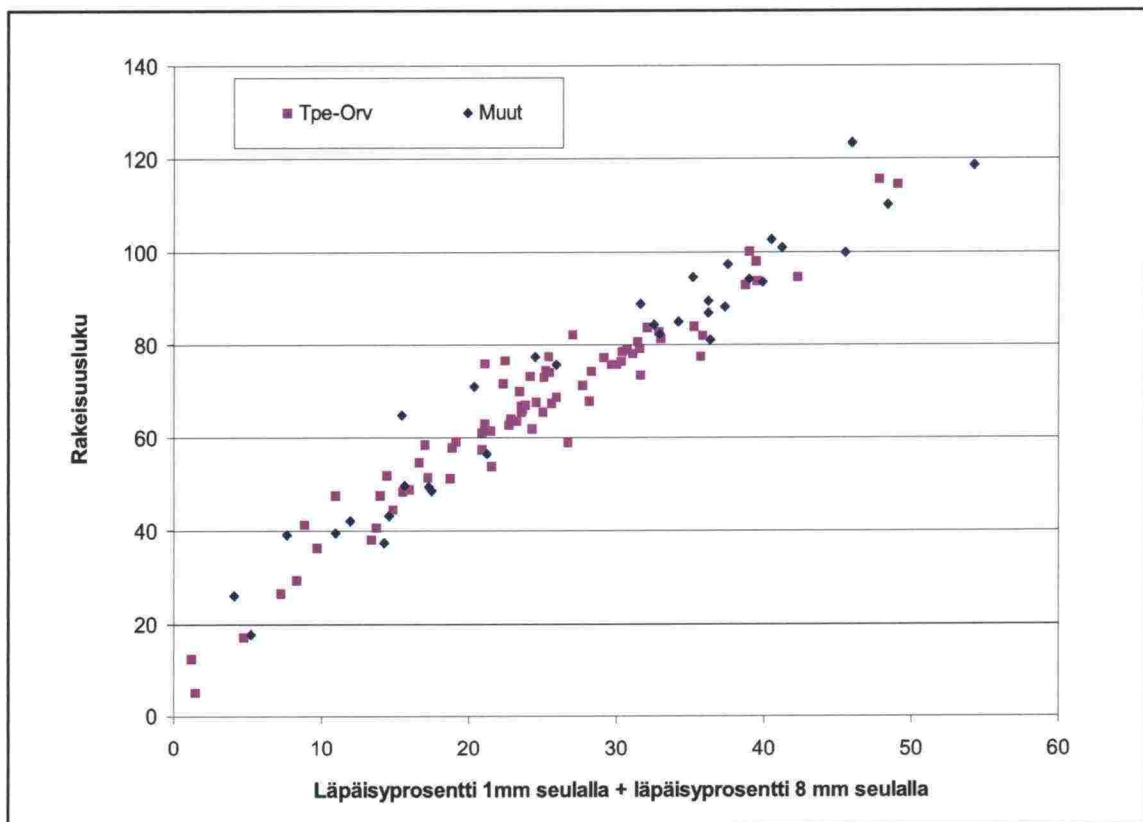
Nykyisin tukikerroksen puhdistusta edellyttävänä hienontumisen rajana on pidetty rakeisuusluvun arvoa 88 (esim. Nurmikolu, 2004). Tukikerroksen toimintakyvyn voidaan arvioida heikkenevän erityisesti kaikkein hienoimpien laitteiden osuuksien kasvaessa. Tästä syystä 25 mm seulan läpäisyprosenttia ei voida pitää parhaiten tukikerroksen toimintakykyä kuvaavana tekijänä. Asian merkitys korostuu tulevaisuudessa, kun aletaan arvioida vuodesta 1995 käytettyjen raekooltaan 31.5/63 mm raidesepelien hienontuneisuutta. Tällöin 25 mm seulan läpäisyprosentiksi saadaan ratkaisevasti pienempi arvo verrattuna vastaavan määrän hienoimpia laitteita sisältävään raidesepeliin, jonka alkuperäinen raekokojakautuma on ollut välittömästi 25 mm:stä ylöspäin, eli vuoteen 1995 asti käytetty 25/55 mm. Sopiva tukikerroksen toimintakuntoa osaltaan kuvaava parametri olisi varmasti hienoainespitoisuus (<0.063 mm). Sen määrittäminen edellyttää kuitenkin edellä esitetyn perusteella pesuseulontaa, mikä lisäisi satoja näytteitä käsiteltäessä seulontatyötä melko tuntuvasti. Kun tarkastellaan kuvissa 4.4 ja 4.5 esitettyjen rakeisuuden eri tunnuslukujen keskinäisiä suhteita, rakeisuuslukua 88 likimäärin vastaavana ja periaatteeltaan paremmin tukikerroksen toimintakykyä kuvaavana tekijänä voitaisiin pitää 8 mm ja 1 mm läpäisyprosenttien summaa 35 (kuva 4.5). Eri tunnuslukujen väliset yhteydet eivät 0.063 mm seulan läpäisyprosenttia lukuun ottamatta vaikuta oleellisesti riippuvan lähtökiviyneisestä.

Edellä esitetyn lisäksi on huomattava, että veden pidättymiseen ja routimisherkkyyteen pohjautuvan tarkastelun ohella puhdistusrajaa tulisi arvioida myös raidegeometrian poikkeamiin, niiden toistuvuuteen ja tukemisen tehokkuuteen perustuen. Raidegeometrian poikkeamista ja tukikerrosaineksesta määritettyjen parametrien korrelaatio-tarkastelu olisi aiheeseen sopiva lähestymistapa.



Kuva 4.4. Eri seulojen läpäisyprosenttien yhteys rakeisuuslukuun.

Kuvasta 4.4d nähdään, että rakeisuuslukua 88 vastaavassa raidesepelissä läpäisy 25 mm seulalla on noin 50–55 %. Koska sepelin puhdistuksessaataan palautetaan juuri 25 mm seulalle jäävät rakeet, tällä arviolla puhdistusrajan saavuttaneesta tukikerroksestaataan olisi palautettavissa noin 45–50 %. Useissa tapauksissa toteutunut raidesepelin palautusosuus on ollut 50 % luokkaa, joten näissä tapauksissa sepelinpuhdistus voidaan todeta tehdyksi suunnilleen teoreettisesti järkeväksi arvioidulla puhdistusrajalla.



Kuva 4.5. Rakeisuussluvun yhteys 1 mm ja 8 mm läpäisyprosenttien summaan.

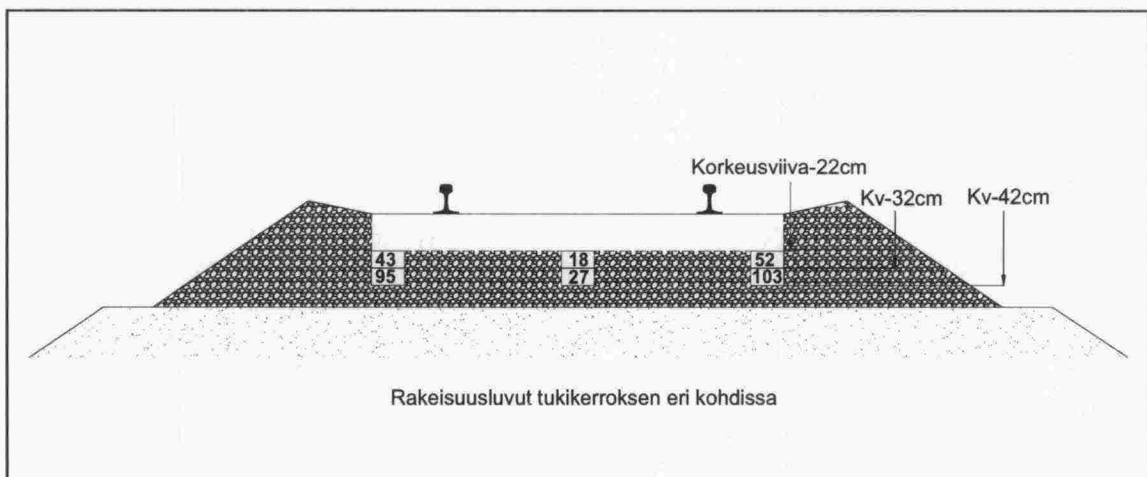
Tukikerroksen toimintakunnon arvioimiseen parhaiten soveltuva rakeisuusnäytteiden ottotaso on tärkeä, mutta vaikea periaatteellinen kysymys. Kuten tunnettua hienorakeinen aines varisee tukikerroksen huokostilassa kerroksen pohjalle. Näin ollen etenkin hienonemisprosessin alussa tukikerroksen pohjalla on pintaosiin verrattuna huomattavasti enemmän hienorakeista ainesta. Hienonemisen edetessä huokostila täyttyy ja hienorakeista ainesta alkaa kerääntyä yhä ylemmille tasoille. Oleellinen kysymys on siis se, onko tukikerroksen toimintakunnon kannalta tärkeämpää, että sen yläosissa on jäljellä toimintakuntaa ylläpitävää tyhjää huokostilaa vai se, että huokokset alemmilla tasoilla ovat toimintakuntaa heikentävän hienorakeisen aineksen täyttämiä. Muodonmuutosominaisuuksia ja tukemisen tehokkuutta ajatellen tukikerroksen yläosissa vapaana oleva huokostila lienee riittävä toimivuutta ylläpitävä tekijä, mutta toisaalta vedenpidättymistä ja routimisherkkyyttä ajatellen hienoaines on vahingollista korkeustasosta riippumatta. Asian ristiriitaisuus korostuu poikkeuksellisen paksuissa tukikerroksissa, joissa suhteellisen vähän hienontunut tukikerros saattaa ulottua melko syvällekin, mutta pohjalla on kuitenkin selvästi hienontunut kerros. Esitetyn ongelmakentän perusteella on selvää, että nykyisen Tukikerroksen laadun tutkimusohjeen (Ratahallintokeskus, 1997) mukaisesti tasolta Kv-30cm...Kv-40cm otettu näyte ei yksikäsitteisesti ilmennä tukikerroksen toimintakuntaa. Toisaalta näytteenottotason linkittäminen vakioetäisyydelle tukikerroksen pohjasta mitattuna jättäisi kerrospaksuuden vaihdellessa vastaavasti huomiotta tukikerroksen pintaosan mahdollisen hyväkuntoisuuden. Lisäksi tuki- ja välikerroksen rajan määrittäminen on harvoin yksikäsitteistä.

Kaksitahoisen ongelman tarkastelussa oivallinen apuväline olisi koko tukikerroksesta näytteenoton mahdollistavan sydännäytekairan käyttö. Ruotsissa on käytössä tällainen

vanhaan tukemiskoneeseen rakennettu laitteisto, Ballastprovtagare - MUM 9601, jota on esitelty aiemmassa julkaisussa (Nurmikolu, 2000). Tällaisella automatisoidulla näytteenottimella myös riskit näytteenoton satunnaisvirheille minimoituvat. Lisäksi tukikerrospaksuuden arviointi on mahdollista samoin kuin näytteenotto tukikerroksen alapuolisista rakennekerroksista. Ratkaisuja tukikerroksen hienontuneisuuden ja toimintakunnon arviointiin saattaa löytyä maatulkaussovellutuksista (Silvast ja Nurmikolu, 2005). Tukikerrospaksuuden samoin kuin rakennekerrosten kokonaispaksuuden määrittämiseksi maatulkaus on toimiva keino jo nykyisillä sovellutuksilla.

On hyvin tavallista, että korkeusviivan nostoista ja pohjamaan painumisista johtuen tukikerrospaksuus on selvästikin suurempi kuin betoniratapölkkyraiteessa vaadittu (Ratahallintokeskus, 2002) 55 cm. Tästä syystä sepelinpuhdistus on tärkeää ulottaa riittävän alas, jotta tukikerroksen alaosaan, välikerroksen pinnalle, rikastunut hienorakeinen aines tulee poistetuksi. Erityisen ongelmalliseksi riittävän puhdistussyvyyden toteuttaminen muodostuu routaeristetyissä rakenteissa, kun välittömästi tukikerroksen alla sijaitseva routalevy on edelleen toimintakykyinen ja siten tarkoitus jättää ehjänä rakenteeseen. Mikäli em. hienorakeista kerrosta ei seulonnan yhteydessä puhdisteta, rakenteeseen jää routimisherkkä ja vedenläpäisevyyttä heikentävä kerros ja puhdistuksesta saatu hyöty on tässä mielessä vähäinen.

Rataosalla Tampere–Orivesi tehdyn aukikaivun yhteydessä tarkasteltiin raidesepelin hienontuneisuutta ratarakenteen poikkileikkauksen eri kohdissa. Seulonnoin määritetyt rakeisuusluvut on esitetty kuvassa 4.6. Kuvasta nähdään, kuinka hienoneminen raiteen keskiosissa oli oletetun mukaisesti hyvin vähäistä. Sen sijaan ratapölkyn päissä hienorakeista ainesta oli runsaasti etenkin tukikerroksen alaosaan rikastuneena. Havaittu hienoneminen arvioitiin yhdessä riittämättömän tukikerrospaksuuden kanssa syyksi noin 4000 vastavaihdetun betoniratapölkyn rikkoontumiseen osuudella. Kiskoja alla ja pölkkyjen päissä voimakkaasti hienontuneen tukikerroksen jousto ja hyväkunton sepelin kantaminen raiteen keskellä arvioitiin johtaneen murtolujuuden ylittäviin vetojännityksiin ratapölkkyjen yläpinnoilla. Aiemmin esitettyyn pohdintaan viitaten havainto puoltaa sitä, että suhteellisen hyväkunton sepelikerros tukikerroksen yläosissa ei välttämättä riitä koko tukikerroksen toimintakunnon turvaamiseksi.



Kuva 4.6. Tampere–Orivesi-rataosalla betoniratapölkkyjen rikkoontumisselvitysten yhteydessä todettu hienontuneisuuden voimakas riippuvuus näytteenottokohdan sijainnista tukikerroksen poikkileikkauksessa. Näytteet on otettu ratapölkyn alta.

4.3 Karkeiden kiviainespartikkelien fysikaaliset ominaisuudet

4.3.1 Lujuus-, raemuoto ja petrografia

Tukikerroksista otetuille sepelinäytteille tehtyjä lujuus-, raemuoto- ja ohuthietutkimuksia on raportoitu aiemmassa (Nurmikolu, 2000) julkaisussa. Tässä yhteydessä näitä tutkimuksia tehtiin pääosin vain käyttämättömille kalliomurskeille tukemaan niiden hienonemistarkasteluja luvussa 6 käsitellyissä syklisissä toistokuormituskokeissa. Kyseisten tutkimukset tulokset on raportoitu luvussa 6.6 ja liitteessä 3.

Kaksi yksittäistä ohuthietarkastelua tehtiin kuitenkin rataosilla Tornio–Kolari km 920+180 ja Tuomioja–Raahe km 714+600 silmämääräisestikin selvästi pinnoiltaan rapautuneeksi havaituille raidesepeleille (liite 2). Tor–Kol-rataosalla kyseinen raidesepeli oli mitä ilmeisimmin alkuperältään Kemin kaivoksen kromituotannon sivukiveä. Näytteenottokohteessa havaittiin muutamia kymmeniä silmämäärin arvioituna pinnoiltaan voimakkaasti rapautuneita sepelirakeita (vrt. myöhemmin kuva 4.12, yläriivi). Ohuthietutkimuksen perusteella mineraalikoostumuksen päämineraaleja näytteessä havaittiin olevan pehmeä talkki (43 %) ja biotiitin muuttumistuotteena kloriitti (21 %). Myös näytteen muut mineraalit olivat voimakkaasti muuttuneita ja hyvin rikkonaisia näytteen rapautumislukan ollessa Rp2 (Uusinoka, 1975). Pahimmillaan kiviaineksen kemiallinen rapautuminen oli edennyt niin pitkälle, että rakeen kulmia pystyttiin irrottamaan käsin.

Tarkastelluissa Tornio–Kolari-rataosan raidesepelirakeissa kemiallinen rapautuminen oli merkittävää, mutta toisaalta silmämäärin arvioituna rajoittunut ainakin näytteenotto-kohteessa melko pieneen määrään rakeista. Kyseinen kiviaines saattoi olla kohteessa täydennyssepeleä ja sen osuus tukikerroksesta siten ainakin kyseisellä kohdalla verraten vähäinen. Toinen mahdollisuus on, että kaikkein pahiten rapautunutta ainesta on alkuperäisessä kiviaineksessa ollut vain vähäinen määrä. Joka tapauksessa voimakas muuttuminen maasälpien, pyrokseenien ja sarvivälkkeen osalta (liite 2) viestii siitä, että kiviainesta heikentävä rapautuminen oli tapahtunut satojentuhansien vuosien kuluessa jo ennen kiviaineksen murskausta. Näin ollen vaikuttaisi siltä, että pääasiallinen ongelma kyseisessä kohteessa ei ole raideseppelin kemiallinen rapautuminen ratarakenteessa, vaan pitkäaikaisen kemiallisen rapautumisen heikentämän kiviaineksen asentaminen rataan. Raideseppelin heikko lujuus olisi varmasti tullut esille jo rataan asennusta edeltävissä lujuuskokeissa tai petrografisessa tutkimuksessa, joiden tekeminen on nykyisin raideseppelin CE-merkinnän saamisen edellytys.

Näytteen Tmj–Raa 714+600 osalta kemiallinen rapautuminen ilmeni rakeiden pinnoille saostuneista rautayhdisteistä (ks. kuva 4.7). Ohuthietutkimuksella (liite 2) varmistuttiin siitä, että rauta oli peräisin itse kiviaineksesta eikä ulkoisista lähteistä. Ohuthietarkastelussa kiviaineksen todettiin sisältävän herkästi rapautuvia opaakkimineraaleja (4.4 %). Opaakkien (sulfidit, oksidit) ja tummien mineraalien (biotiiitti ja amfibolit), rapautuessa rauta irtoaa kiviaineksesta, hapettuu ja muodostaa eri yhdisteinä (rautahydroksidit ja oksidit) saostumia (esim. Uusinoka, 1975). Toisaalta rakeiden pinnoille saostunut rauta voi joissakin tapauksissa olla peräisin jostakin varsinaisen sepelikiviaineksen ulkopuolisesta lähteestä. Rautatiessä tällaisia mahdollisia raudan lähteitä voisivat yleisesti olla esimerkiksi rautamalmivaunuista pudonnut aines ja ainakin teoriassa kiskojen ja pyörien kulumisessa tai kiskojen hionnassa irronnut aines

sekä paikallisesti muut satunnaiset tekijät. Tästä syystä rautasaostumia tarkasteltaessa tulee tarkoin arvioida, onko rauta peräisin sepelikiviaineksesta ja siten merkki raidesepelin kemiallisesta rapautumisesta. Näytteessä Tmj–Raa 714+600 rautaa oli vapautunut opaakimineraalien ohella myös kiilteen rapautuessa kloriitiksi (26 %).



Kuva 4.7. Rautayhdisteiden pinnoittama, selvästi rapautunut tukikerrosnäyte Tmj–Raa 714+600 (oikealla) ja tavanomainen rapautumaton näyte (vasemmalla).

Päinvastoin kuin em. Tor–Kol-näytteessä, kyseisen Tmj–Raa-näytteen kemiallinen rapautuminen on tapahtunut kiviaineksen tuotannon jälkeisenä aikana, koska rakeiden pintarakenne oli selkeästi rapautunutta kaikilta lohkopinnoiltaan. Kyseessä on siten rataverkollamme ensimmäinen havainto käyttöiän aikana ratarakenteessa tapahtuvasta kemiallisesta rapautumisesta. Toisaalta nykyisen tietämyksen mukaan opaakimineraaleja saa esiintyä raidesepelikiviaineksessä enintään 3 % ja kloriittia enintään 5 %, mitkä vaatimukset on implementoitu myös Ratahallintokeskuksen nykyisiin raidesepelin laatuvaatimuksiin (vrt. luku 7.1) (Ratahallintokeskus, 2005). Myös toisessa Tmj–Raa-rataosan näytteessä (km 703+170) raepinnoilla oli havaittavissa rautayhdisteitä, mutta selvästi vähemmän kuin km 714+600. Muissa tarkastelluissa tukikerrosnäytteissä rautayhdisteitä saattoi havaita vain yksittäisissä rakeissa lähinnä näytteissä Iis–Yvk 664+600, Vii–Sii 577+000, Vii–Sii 541+920, Oul–Lau 756+150, Kuo–Iis 518+837 ja Kok–Oul 699+990 (ks. kuva 4.8).

Aiemmin tukikerrosten palteista otetuille raidesepelinäytteille raportoiduissa (Nurmikolu, 2000) ohuthietarkasteluissa ei havaittu kiviaineksen rakennetta heikentävää kemiallista muuttumista. Myöskään tässä yhteydessä tarkastelluissa tapauksissa em. Tornio–Kolari ja Tuomioja–Raahe-rataosien näytteitä lukuun ottamatta sepelirakeissa ei silmämääräisesti havaittu merkittävää rapautumista.



Kuva 4.8. Yleiskuva sepelirakeisiin kiinnittyneiden rautayhdisteiden havainnoinnista tarkasteltujen tukikerrosnäytteiden pesun jälkeen. Kuvassa on nähtävissä myös näytteiden hienoaainesten värit ennen (oik.) ja jälkeen (vas.) hehkutuksen (ks. myös kuva 4.22).

Yleisenä huomiona ratojen perusparannusten suunnittelua ajatellen tukikerroksen sisältämän raidesepelin lujuuden selvittäminen on tärkeää, jotta pystytään arvioimaan, onko raidesepelin seulonnessa saatavan karkearakeisen aineksen palauttaminen rataan ylipäättään järkevää. Arvioinnissa tulee toisaalta huomioida uudelle täydennyssepelille asetetut vaatimukset. Asian periaatteellinen merkitys on huomattava, sillä 1960–80-luvuilla perusparannetuissa tukikerroksissa raidesepelin lujuus melko harvoin vastaa nykyvaatimuksia.

4.3.2 Veden imeytyminen

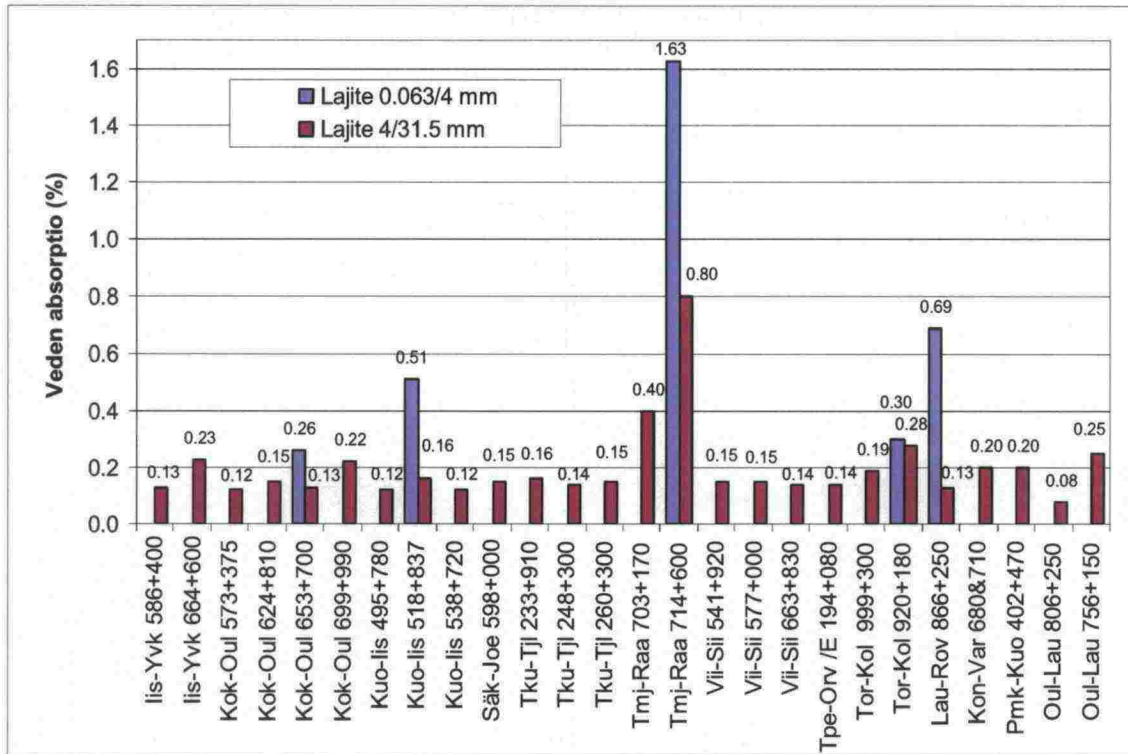
Kiviaineksen huokoisuus ja sen mahdollistama veden imeytyminen ovat määrääviä tekijöitä ajatellen kiviaineksen herkkyyttä pakkasrapautumiselle käyttöiän aikana rakenteessa. Toisaalta veden imeytyminen ilmentää kiviaineksessa jo tapahtunutta kemiallista rapautumista ja huokoistumista. Jossain määrin veden absorptio antaa varmasti viitteitä myös mahdollisesta käyttöiän aikana tapahtuvasta kemiallisesta rapautumisalttiudesta.

Tarkastelluissa 26 tukikerrosnäytteessä lajitteesta 4/31.5 mm määritettyjen veden absorptioiden keskiarvo oli 0.20. Yleisestä linjasta selvästi poikkeavan suuret (0.80 ja 0.40) vedenimut olivat Tuomioja–Raahe-rataosuuden näytteissä (ks. kuva 4.9, taulukko 4.4). Muiden tukikerrosnäytteiden osalta veden absorptiot olivat varsin pieniä (max 0.28) ja hajonta melko vähäistä. Ilman Tuomioja–Raahe-osuuden näytteitä veden absorptioiden keskiarvo oli 0.16, johon nähden selvästi suurempia olivat myös näytteiden Tor–Kol 920+180 (veden adsorptio 0.28), Oul–Lau 756+150 (0.25), Iis–Yvk 664+600 (0.23) ja Kok–Oul 699+900 (0.22) vedenimut. Edellisessä luvussa esitetyt havainnot näytteiden rapautuneisuudesta ja rautasaostumista sopivat tuloksiin hyvin. Edellä kuvattuun rapautuneisuuteen suhteutettuna näytteen Tor–Kol 920+180 verraten alhainen veden absorptio selittyy voimakkaasti rapautuneiden rakeiden vähäisellä määrällä näytteessä tai toisaalta talkin hydrofobisilla ominaisuuksilla.

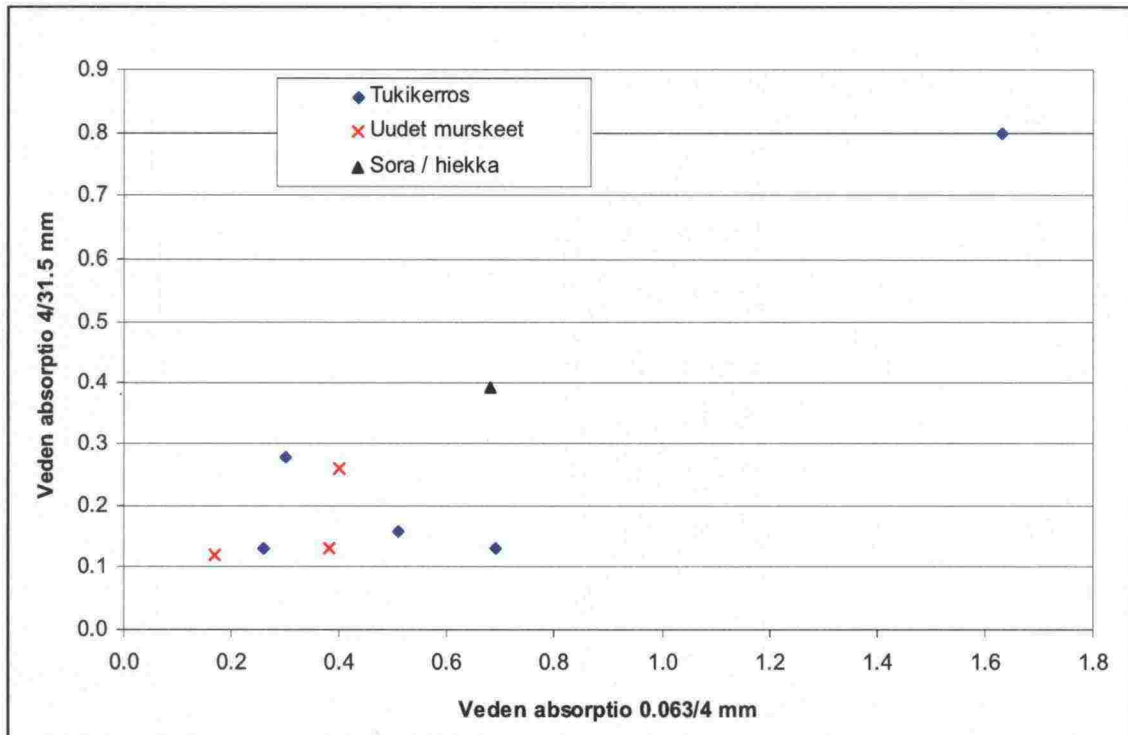
Tukikerrosnäytteiden pienemmästä, 0.063/4 mm, lajitteesta määritettiin viidestä näytteestä veden absorptiot humuksen poispolton (vrt. luku 3.1.2) jälkeen. Kussakin näistä veden absorptio oli suurempi kuin vastaavan näytteen isommassa lajitteessa. Näytteessä Tor–Kol 920+180 ero oli vähäinen, mutta neljässä muussa näytteessä veden absorptio lajitteessa 0.063/4 mm oli 2–5-kertainen lajitteeseen 4/31.5 mm verrattuna. Eri lajitteista määritetyt veden absorptiot korreloivat keskenään ehkä hieman yllättävän heikosti (ks. kuva 4.10) etenkin ottaen huomioon näytteiden rakeisuuden vakioinnin (vrt. luku 3.1.2).

Taulukko 4.4. Veden absorptiot, kiintotiheydet ja jäädytys-sulatuskokeiden tulokset.

Näyte	Lajite 0.063/4 mm		Lajite 4/31.5 mm		Jäädytys-sulatus	
	Kiinto- tiheys (t/m ³)	Veden absorptio (%)	Kiinto- tiheys (t/m ³)	Veden absorptio (%)	Lajite 4/8 mm	Lajite 8/16 mm
Iis-Yvk 586+400			2.98	0.13		
Iis-Yvk 664+600			2.76	0.23	0.88	0.20
Kok-Oul 573+375			2.72	0.12		
Kok-Oul 624+810			2.63	0.15		
Kok-Oul 653+700	2.93	0.26	2.92	0.13	0.26	0.12
Kok-Oul 699+990			2.88	0.22		
Kuo-Iis 495+780			2.86	0.12		
Kuo-Iis 518+837	3.13	0.51	3.03	0.16	0.64	0.23
Kuo-Iis 538+720			2.91	0.12		
Säk-Joe 598+000			2.79	0.15	0.61	0.20
Tku-Tjl 233+910			2.82	0.16		
Tku-Tjl 248+300			2.76	0.14	0.34	0.15
Tku-Tjl 260+300			2.71	0.15		
Tmj-Raa 703+170			2.84	0.40		
Tmj-Raa 714+600	2.91	1.63	2.84	0.80	4.91	2.58
Vii-Sii 541+920			2.85	0.15		
Vii-Sii 577+000			2.85	0.15	0.75	0.16
Vii-Sii 663+830			2.82	0.14		
Tpe-Orv /E 194+080			2.71	0.14		
Tor-Kol 999+300			2.74	0.19		
Tor-Kol 920+180	3.15	0.30	2.95	0.28	0.79	0.31
Lau-Rov 866+250	2.79	0.69	2.75	0.13	0.21	0.14
Kon-Var 680&710			2.73	0.20		
Pmk-Kuo 402+470			2.76	0.20		
Oul-Lau 806+250			2.92	0.08		
Oul-Lau 756+150			2.99	0.25		
Kon-Tai km 665, raidesora	2.68	0.25				
Orv-Jmk 248+120, välikerros	2.66	0.42				
Kon-Var 710+880, välikerros	2.66	0.19				
Oul-Kon km 849, välikerros	2.65	0.17				
Pmk-Kuo 402+470, välikerros	2.65	0.48				
Kankaanpää, hiekka	2.65	0.26				
Vesanka, hiekka	2.64	0.36				
Vesilahti, sora	2.66	0.68	2.70	0.39		
km 50+700	2.63	0.38	2.63	0.13		
Lakalaiva	2.78	0.17	2.77	0.12		
km 80+500			2.63	0.18		
km 85+600	2.77	0.40	2.75	0.26		
km 88+200			2.64	0.10		
km 88+800			2.70	0.11		



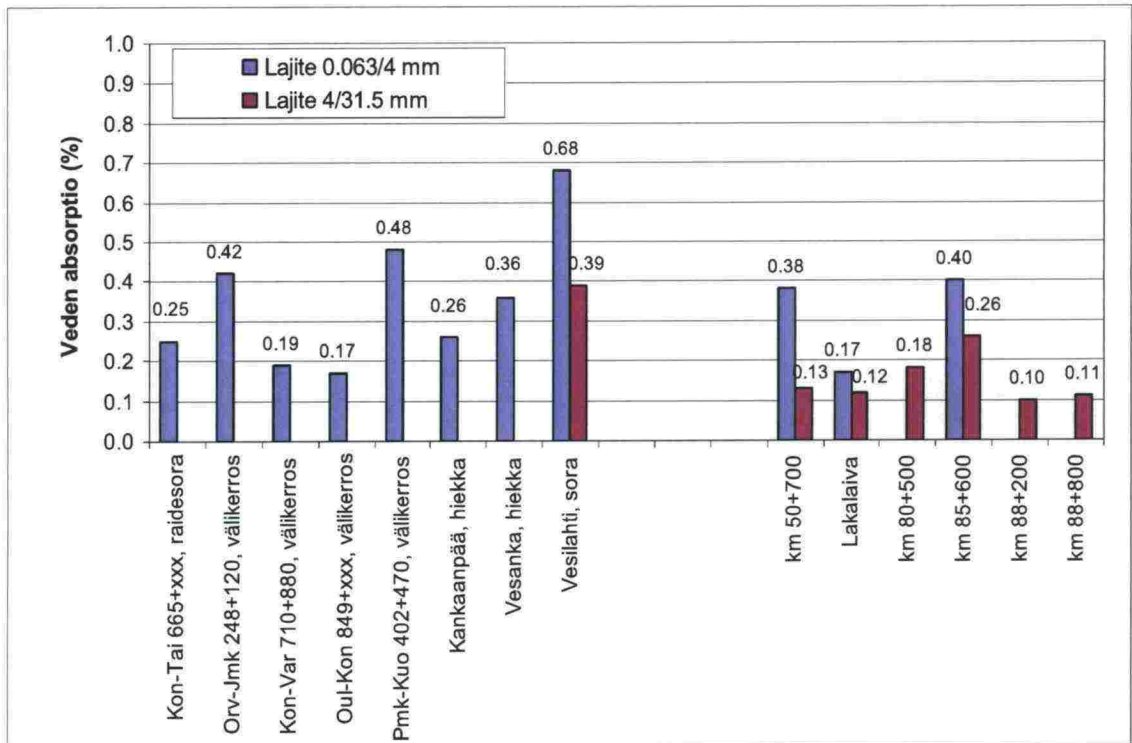
Kuva 4.9. Tukikerrosnäytteistä määritetyt veden absorptiot.



Kuva 4.10. Eri lajitteista määritettyjen veden absorptioiden yhteys tutkituissa näytteissä.

Käyttämättömille kalliomurskeille sekä sora- ja hiekkamateriaaleille tehtyjen vedenimukokeiden tuloksia on havainnollistettu kuvassa 4.11. Myös näissä näytteissä pienemmän lajitteen vedenimu oli isompaan lajitteeseen verrattuna suurempi kussakin neljässä tarkastellussa näytteessä. Huomattavaa luonnollisten maalajien osalta on veden absorptioiden selvästi suurempi hajonta tukikerrosnäytteisiin verrattuna sekä toisaalta

etenkin Vesilahden soran verraten suuri vedenimu. Hajonnan voidaan ajatella ainakin osaksi ilmentävän eroja rapautumisen kehittyneisyydessä. Yleisesti ottaen edellytykset luonnollisten maalajien rapautumiselle ovat tuhansien vuosien kuluessa olleet täysin erilaiset verrattuna vain muutaman vuosikymmenen raepinnoiltaan ilmastorasituksille alttiina olleisiin kalliomurskeisiin.

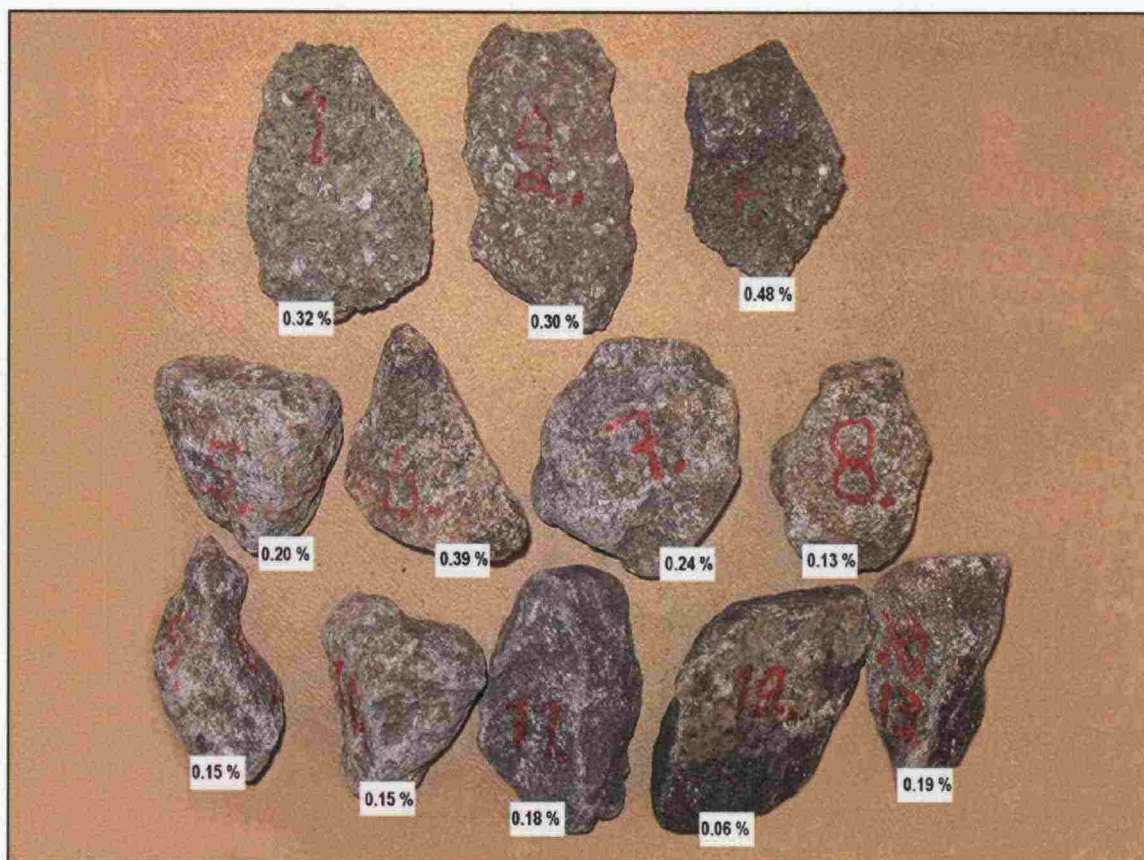


Kuva 4.11. Sora- ja hiekanäytteistä (vas.) ja uusista murskeista (oik.) määritetyt veden absorptiot.

Uusien murskeiden osalta niiden veden absorptioiden yleistaso vastasi hyvin tukikerrosnäytteistä määritettyä yleistä tasoa Tuomioja–Raahe-osuuden näytteitä lukuun ottamatta. Otosten pienestä koosta huolimatta vaikuttaisi siis siltä, että kiviainesten vedenimukyvyt eivät tukikerroksessa vuosikymmenien saatossa normaalitapauksessa ole oleellisesti lisääntyneet ainakaan karkeammassa lajitteessa. Tämä viestisi siitä, että sepelirakeiden rakenne ei yleisessä tapauksessa ole oleellisesti heikentynyt.

Edellisessä luvussa kuvatuista Tornio–Kolari-rataosuudella (km 920) havaituista, pinnoiltaan selvästi rapautuneista rakeista määritettiin vedenimut rackohtaisesti (vrt. luku 3.1.2). Koe tehtiin vertailumielessä myös silmämääräisesti arvioiden rapautumattomille, eri lähdekiviaineksesta peräisin oleville rakeille, joiden veden absorptiot olivat yhtä poikkeusta (0.39) lukuun ottamatta välillä 0.06–0.24. Selvästi rapautuneidenkin rakeiden vedenimut olivat yllättävän pieniä. Silmämääräinkin arvioiden erittäin voimakkaasti rapautuneen rakeen veden absorptio oli tosin 1.42, mutta kolmen muun vähemmän, mutta silti selvästi rapautuneen rakeen veden absorptiot olivat vain 0.30–0.48 (ks. kuva 4.12). Voimakkaasti rapautuneelle rakeelle tehdyn petrografisen tarkastelun tulokset on esitetty liitteessä 2. Nykyiseen tietämykseen perustuvan käytännön (SFS-EN 13242, SFS-EN 13450) mukaisesti kiviaineksen rapautumiskestävyydestä tulisi varmistua lisäkokein, kun sovelletun testiversion (SFS-EN 1097-6, liite B) tuloksena kiviaineksen veden absorptio ylittää 0.50. Näin ollen kyseiset kolme

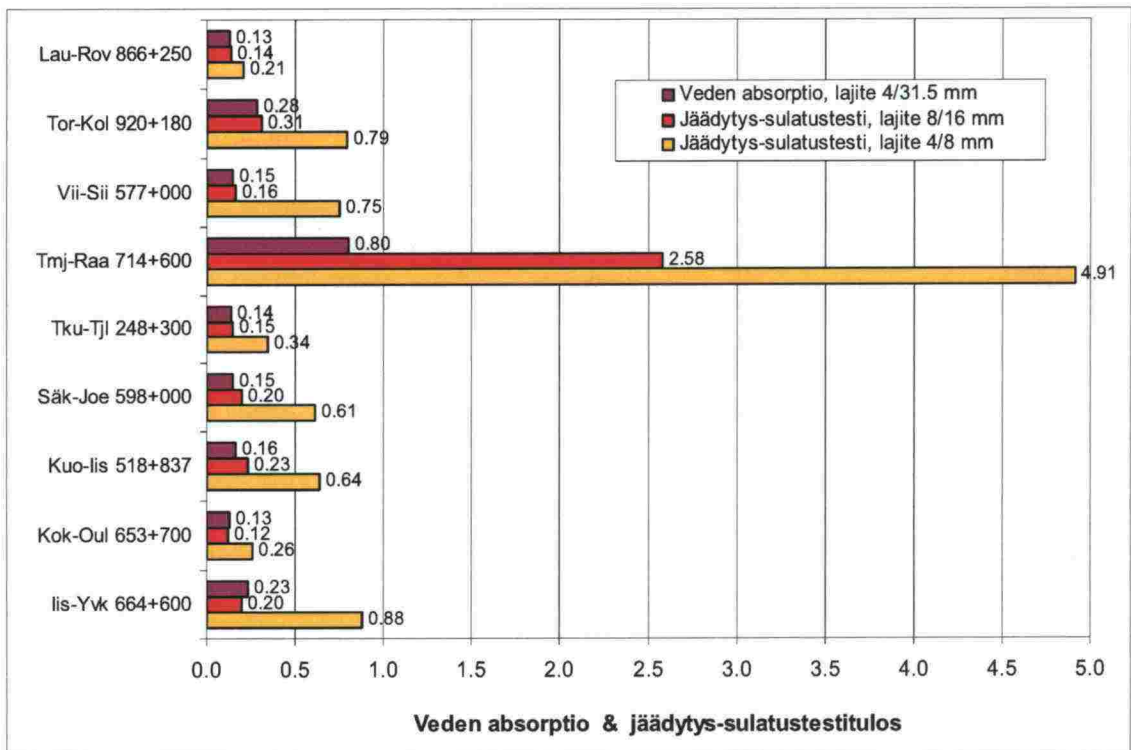
selvästi rapautunutta racta eivät olisi tätä siis edellyttäneet. Verraten alhaiset veden absorptiot viestivät siitä, että kyseisten rakeiden selvästi havaittava rapautuneisuus rajoittuu pääosin niiden pinnoille, eikä rakeiden vedenimun ja siten pakkasrapautumisen mahdollistava huokoisuus ole erityisen voimakkaalla tavalla lisääntynyt.



Kuva 4.12. Pinnoiltaan selvästi rapautuneista sepelirakeista (ylärivi) ja silmämääräisesti arvioiden rapautumattomista rakeista raekohtaisesti määritetyt vedenimut ja kiintotiheydet. Kuvasta puuttuu suurimman vedenimun (1.42) rae, josta tehty ohuthie on kuvattu liitteessä 2.

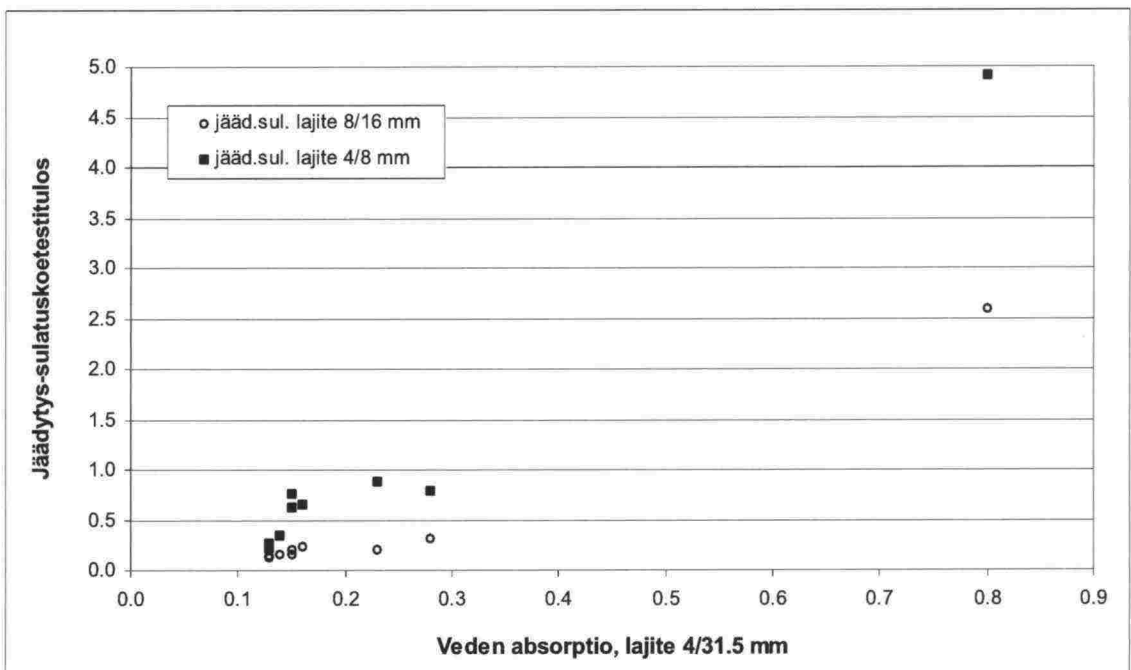
4.3.3 Jäädytys-sulatuskäyttäytyminen

Tukikerrosnäytteiden jäädytys-sulatuskokeiden (vrt. luku 3.1.3) tulosten keskinäiset erot mukailivat veden absorptiokokeiden tuloksia. Näytteen Tmj–Raa 714+600 testituloks oli aivan omaa luokkaansa kokeeseen valituista yhdeksästä kiviaineksesta (ks. kuva 4.13 ja edellä taulukko 4.4). Lajitteesta 8/16 mm määritetty testituloks (2.58) oli likimäärin kymmenkertainen muihin näytteisiin (0.12–0.31) nähden ja erittäin suuri myös muihin tutkimustuloksiin verrattuna. Esimerkiksi laajassa eurooppalaisessa vertailututkimuksessa (Pétursson, 2003), johon mukaan oli nimenomaisesti pyritty saamaan löyhiä ja huokoisia kivilajeja, suurin havaittu keskimääräinen jäädytys-sulatus-testituloks, 1.87, saatiin kalkkikivelle ja seuraavaksi suurin, 1.21, muuttuneelle basaltille. Joltakin osin näytteen Tmj–Raa 714+600 suurta testitulosta saattaa selittää rakeiden pinnoille saostuneiden rautayhdisteiden irtoaminen kokeen vaikutuksesta, mutta toisaalta tämä ei muuta sitä tosiasiaa, että jäädytys-sulatussyklit hienonsivat kiviainesta varsin tehokkaasti. Näin ollen se on altista pakkasrapautumiselle myös ratarakenteessa.



Kuva 4.13. Jäädytys-sulatuskokeiden tulokset yhdessä veden absorptioiden kanssa.

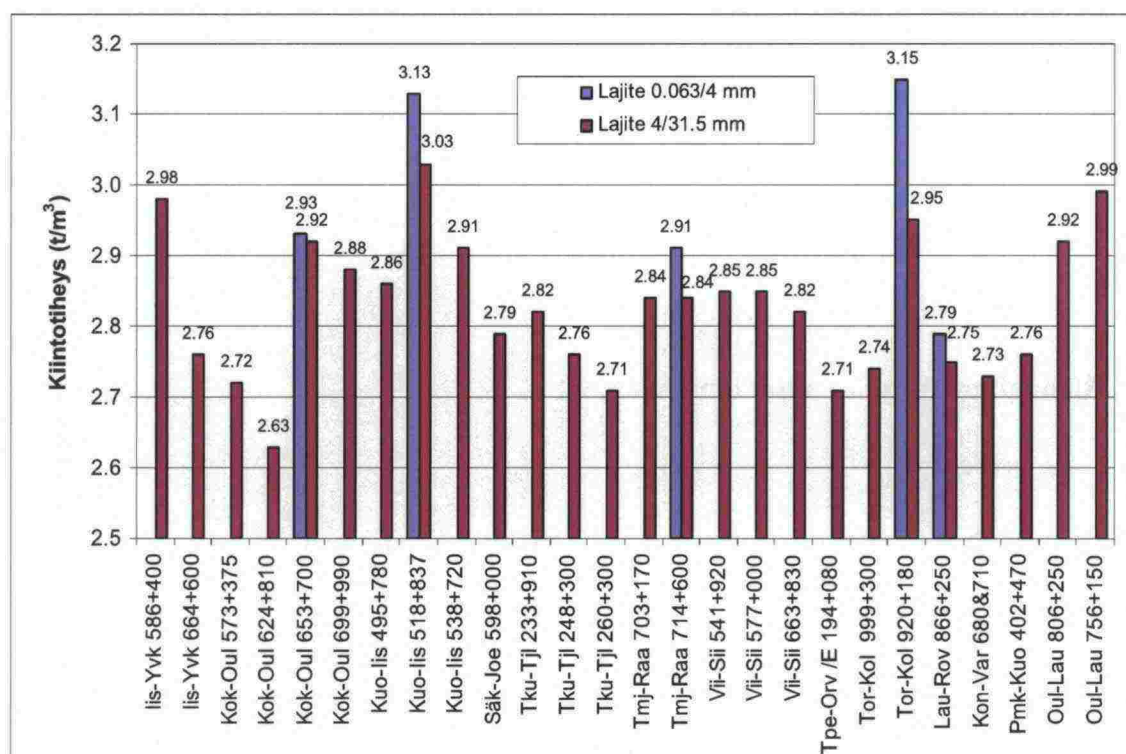
Toiseksi suurin testitulokset (0.31) tarkastelluissa näytteissä oli edellä käsitellyssä, joitakin selvästi rapautuneita rakeita sisältäväksi havaitussa näytteessä Tor-Kol 920+180. Tuloksista on huomattava, että pienemmässä lajitteessa (4/8 mm) testitulokset olivat huomattavasti suuremmat, keskimäärin yli 2.5-kertaiset lajitteeseen 8/16 mm verrattuna. Veden absorptio voidaan kuvasta 4.14 havaita korreloivan kohtuullisen hyvin jäädytys-sulatustestituloksen kanssa.



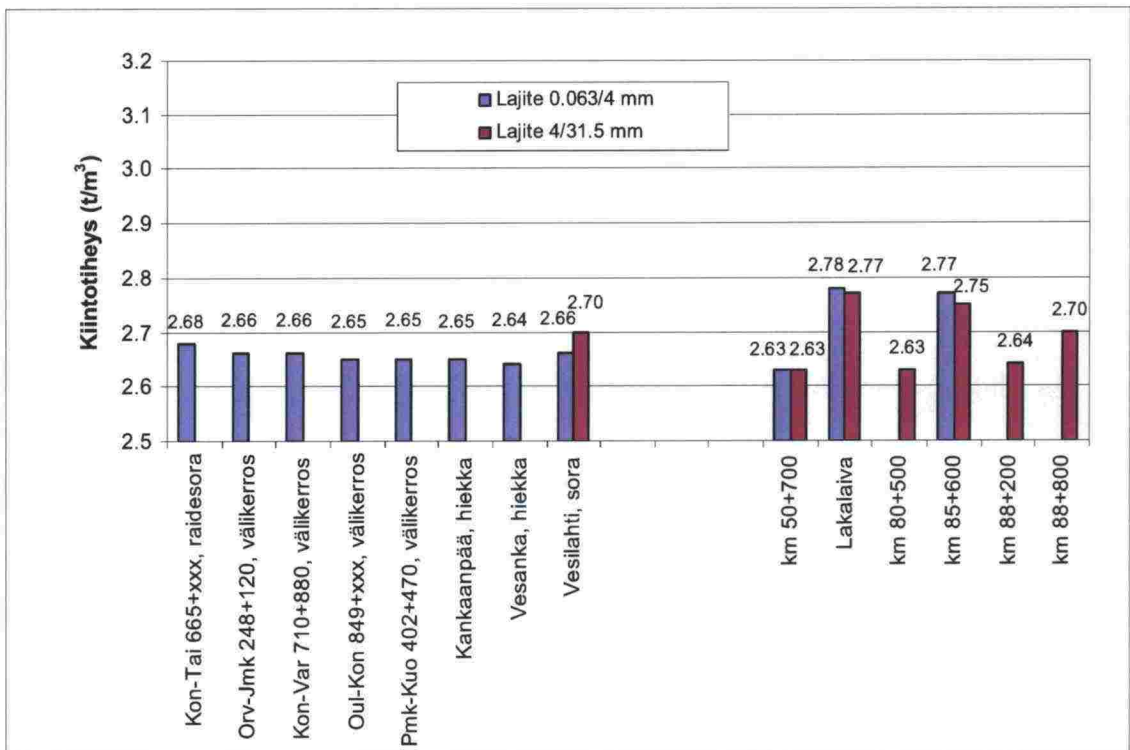
Kuva 4.14. Veden absorptio- ja jäädytys-sulatustestitulosten yhteys.

4.3.4 Kiintotiheys

Vedenimukokeiden yhteydessä määritetyt kiviainesten kiintotiheydet on esitetty kuvissa 4.15 ja 4.16. Tukikerrosnäytteiden samoin kuin uusien kalliomurskeiden välillä kiintotiheyksissä on havaittavissa luonnollista kallioperän vaihteluista johtuvaa hajontaa. Näytteiden kiintotiheydet vaihtelevat välillä 2.63–3.15 t/m³. Sora- ja hiekkänäytteiden kiintotiheydet ovat sitä vastoin materiaalien synnyn aikaisessa kulkeutumisessa ja kerrostumisessa tapahtuneen valikoitumisen selittämänä hyvin lähellä toisiaan vaihdellen ainoastaan välillä 2.64–2.68 t/m³. Tukikerrosnäytteiden eri lajitteista määritetyistä kiintotiheyksistä pienemmästä lajitteesta määritetty kiintotiheys voidaan kussakin viidessä tapauksessa todeta jonkin verran suuremmaksi kuin karkeammassa lajitteessa.



Kuva 4.15. Tukikerrosnäytteistä määritetyt kiintotiheydet.



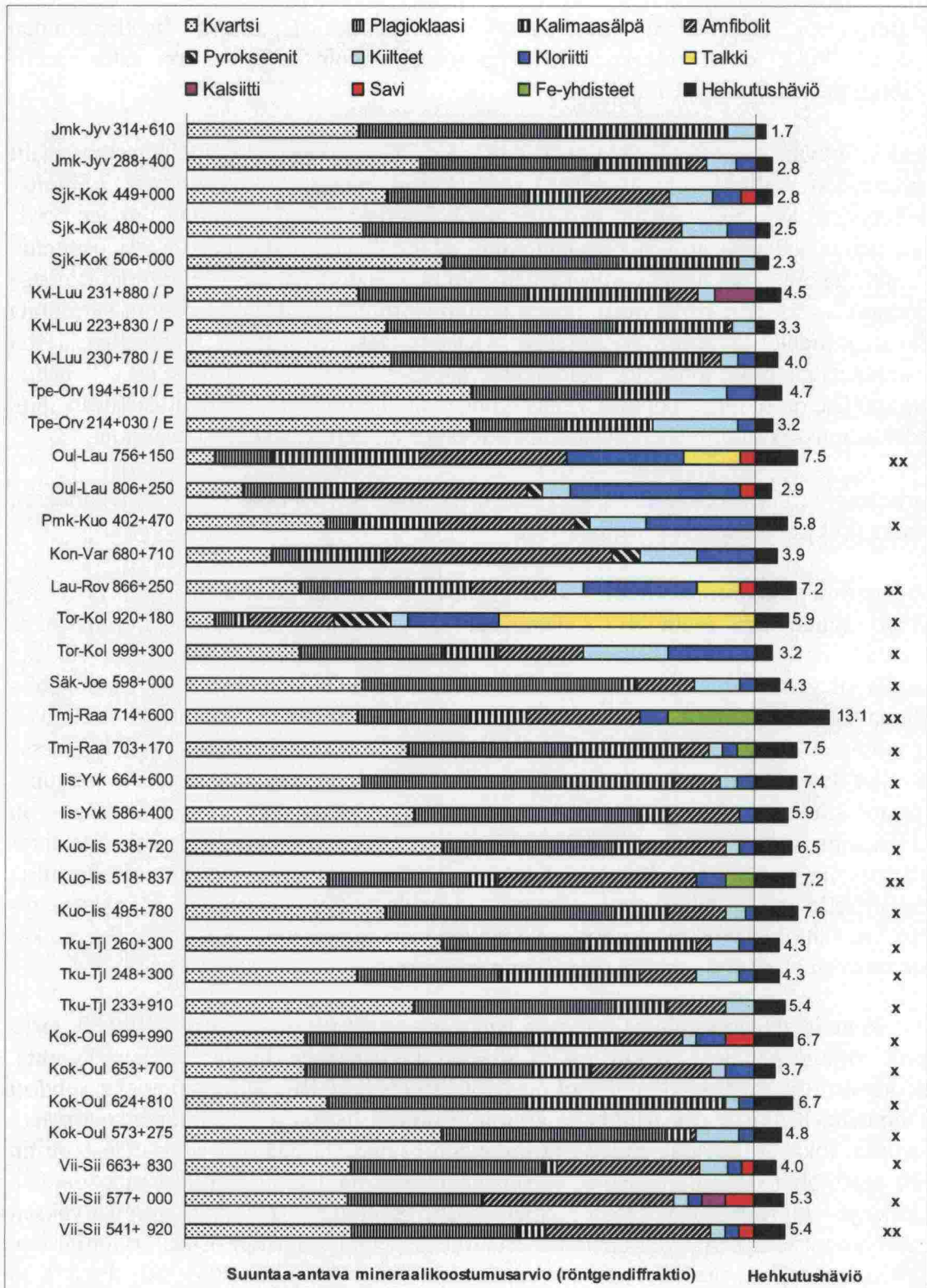
Kuva 4.16. Sora- ja hiekanäytteistä (vas.) ja uusista murskeista (oik.) määritetyt kiintotiheydet.

4.4 Hienoainesten fysikaaliset ominaisuudet

4.4.1 Mineralogia

Näytteiden hienoainesten mineralogian tarkasteltiin röntgendiffraktiomenetelmän avulla. Menetelmän mahdollistamat suuntaa-antavat (vrt. luku 3.2.2) arviot tukikerrosnäytteiden hienoainesten mineraalikoostumuksista on esitetty kuvassa 4.17. Yleisimmät kivimineraalit, kvartsi, maasälvät (plagioklaasi ja kalimaasälpä), ja amfibolit (pääosin sarvivälke) muodostavan yleisessä tapauksessa valtaosan tukikerrosnäytteiden hienoaineksesta (kuva 4.17). Näitä kuvan palkkien rasteroituja alueita voidaan pitää väistämättömänä seurauksena lujankin kiviaineksen tukikerroksessa kohtaamasta mekaanisesta hienonemisesta. Niiden suurta osuutta hienoaineksen kokonaismäärästä voidaan pitää hyvänä asiana sikäli, että se kertoo näiden mineraalien kestävydestä kemiallista muuttumista vastaan myös mineraalien ollessa karkeisiin rakeisiin nähden tuhansia kertoja enemmän kemialliselle toiminnalle altista raepinta-alaa sisältävinä hienoaineksina. Toisaalta on mahdollista, että näidenkin mineraalien muuttumisprosessi on jo käynnistynyt, mutta ei vielä edennyt varsinaisiin rapautumistuotteisiin asti.

Huomiota herättävinä värillisinä osina kuvassa 4.17 on esitetty pehmeät ja helposti murenevat talkki-, kiillemineraalit, helposti murenevat ja liukenevat karbonaattimineraalit sekä pehmeät rapautumistuotteet, kloriitti, savimineraalit ja selkeästi havaitut rautayhdisteet. Pehmeät mineraalit kestävät heikoiten kulutusta kiviaineksessa ja niiden määrä siten todennäköisesti rikastuu hienoainekseen.



Kuva 4.17. Röntgendiffraktioanalyysiin perustuvat suuntaa-antavat arviot mineraalien suhteellisista osuuksista tukikerrosnäytteiden kuivaseulonnassa irronneissa hienoaineksissa sekä niiden hehikutushäviöt (%). x = tuloksissa oli viitteitä runsaasta rautayhdisteiden ja/tai orgaanisen aineksen esiintymisestä. xx = tuloksissa oli viitteitä hyvin runsaasta rautayhdisteiden ja/tai orgaanisen aineksen esiintymisestä.

Radan rakennemateriaalien mahdollisen kemiallisen muuttumisen vaikutuksia voidaan ajatella kolmena tekijänä:

Pahimmillaan mineraalien muuttumisen seurauksena tapahtuva heikkeneminen aiheuttaa koko kiven rakenteen heikkenemisen, jolloin kiviaines on ratkaisevasti alttiimpi mekaaniselle hienonemiselle.

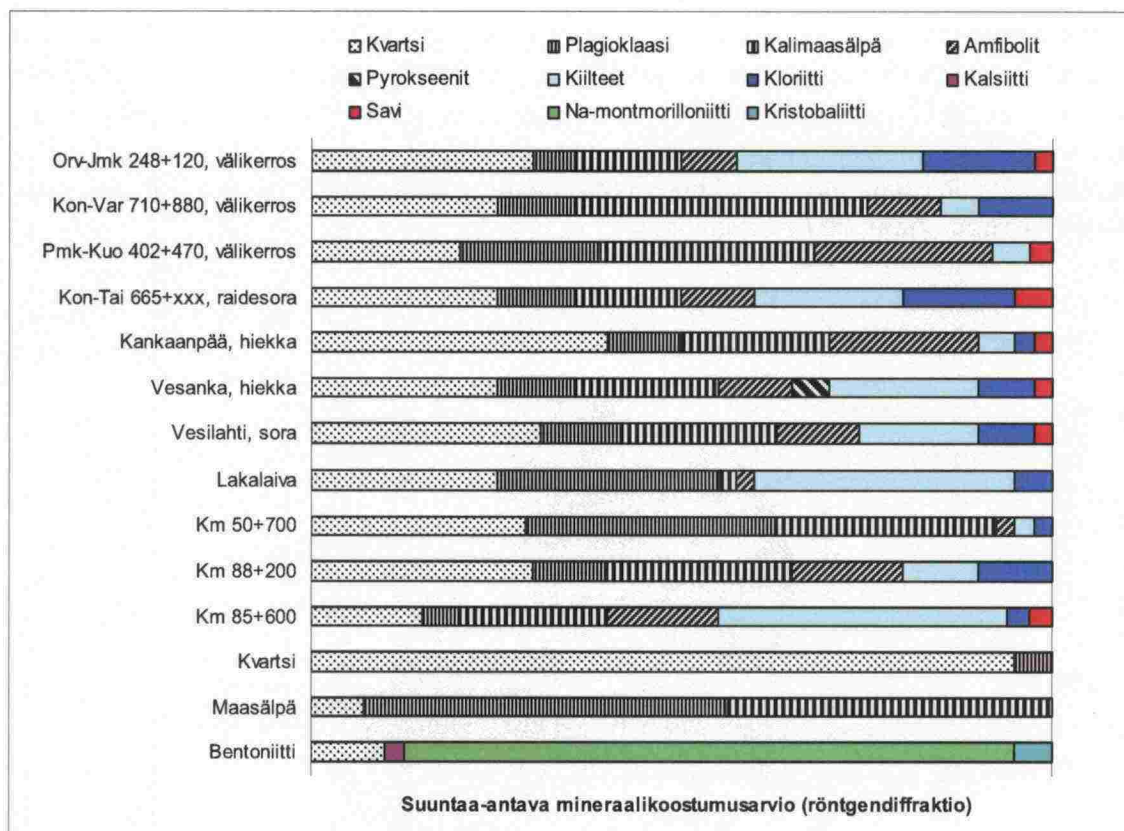
Etenkin hyvin suuren raepinta-alan omaavien hienorakeisten lajitteiden mineraalit saattavat kemiallisen muuttumisen seurauksena muuttua kiviaineksen toimintaedellytysten kannalta entistä haitallisemmiksi aineksiksi. Havaintoja kovien kivi-mineraalien välisistä eroista hienoaineksen vahingollisuutta ajatellen ei ole osoitettu. Oletettavaa on, että näiden mineraalien välillä mahdollisia eroja ei voida yhdistää mineraalilajiin, vaan korkeintaan niiden muuttuneisuuteen liittyviksi. Näihin verrattuna talkin, kiilteen ja kloriitin voidaan yleisellä tasolla ajatella pehmeytensä tai rapautuneisuutensa johdosta kuuluvan hienoaineksen ominaisuuksien kannalta vahingollisempiin mineraaleihin. Eri savimineraalien erityisestä vahingollisuudesta mm. vedensitomis- ja routimisherkkyyssominaisuuksia ajatellen on selkeitä havaintoja.

Karkeampien partikkeleiden rapautuessa niistä irtoaa kiviainekseen uutta kiviaineksen toimintakykyä heikentävää hienoainesta.

Arvioitaessa tukikerrosnäytteiden kemiallista rapautumista oleellinen kysymys on se, ovatko mineraalien muutokset tapahtuneet pääosin ennen kiviaineksen murskausta vuosimiljoonien kuluessa kallion sisällä. Mikäli näin on, rapautumisongelman voidaan ajatella olevan seurausta selkeästi virheellisestä ja ainakin nykytietämyksellä pois-suljettavissa olevasta materiaalivalinnasta, kun rataa on laitettu jo valmiiksi rapautunutta kiviainesta. Jos sen sijaan ratkaisevaa rapautumisprosessin kehitymisessä on ollut kiviaineksen murskauksen ja mekaanisen hienonemisen myötä tapahtunut ilmastorasituksille alttiin raepinta-alan lisääntyminen monituhatkertaiseksi, tilanne on hankalampi. Tällöin tulisi osata määritellä ne kiviainekset ja mineraalit, jotka tuotantovaiheen rapautumattomuudestaan huolimatta ovat raepinta-alan kasvun myötä alttiita kemialliselle muuttumiselle ratarakenteessa. Raidesepeliin verrattuna asian merkitys korostuu lähtökohtaisesti suuremman raepinta-alan ja toisaalta pidemmän käyttöikävaatimuksen omaavissa eristys- ja välikerrosmurskeissa.

Näytekohtaisesti tarkasteltuna erityisen huomioitava oli näyte Tor-Kol 920+180, jossa suuri erittäin pehmeän talkin määrä ilmensi kiviaineksen hyvin heikkoa lujuutta. Talkkia esiintyi myös näytteissä Oul-Lau 756+150 ja Lau-Rov 866+250, joskin selvästi vähemmän. Kaikissa em. näytteissä arvioitiin olevan lisäksi melko huomattava määrä kloriittia, joka on kuvassa esitetyistä kiilteiden osuuksista pääosaa edustavan biotiitin sekä amfibolien rapautumistuote. Kyseisillä osuuksilla Oulun-Tornion ympäristössä talkki ja kloriitti ovat mitä ilmeisimmin seurausta Kemin kromikaivoksen heikkolujuuksisen sivukiven käyttämisestä raidesepelinä. Kloriitin osuus arvioitiin em. näytteiden lisäksi melko huomattavaksi näytteissä Oul-Lau 806+250, Pmk-Kuo 402+470, Tor-Kol 999+300 sekä Kon-Var 680&710. Kiilteen osuudet arvioitiin sitä vastoin kaikissa tukikerrosnäytteissä verraten vähäisiksi ottaen huomioon niiden oletettu rikastuminen hienoainekseen. Yhdessä kloriitin esiintymisen kanssa tämä saattaa ilmentää kiilteen rapautumista kloriitiksi. Kahdessa uudessa murskeessa (Lakalaiva ja oikoradan km 85+600, ks. kuva 4.18) biotiittia oli erittäin runsaasti. Melko runsaasti kiillettä oli myös muutamissa soranäytteissä. Kalsiittia havaittiin vähäisiä määriä kahdessa tukikerrosnäytteessä. Savimineraalien runsas esiintyminen indikoisi huolestuttavalla tavalla myös kovien kivimineraalien pitkälle edenneestä

rapautumisesta. Tästä syystä niiden arvioidun osuuden vähäisyyttä, enimmillään vain noin 5 %, voidaan pitää hyvänä, hienorakeisen aineksen katastrofaalisen nopeaa rapautumiskehitystä poissulkevana, signaalina hienorakeisimmankin aineksen rapautumiskestävyydestä. Toisaalta vähäisiä määriä savimineraaleja arvioitiin esiintyvän verraten useassa näytteessä.

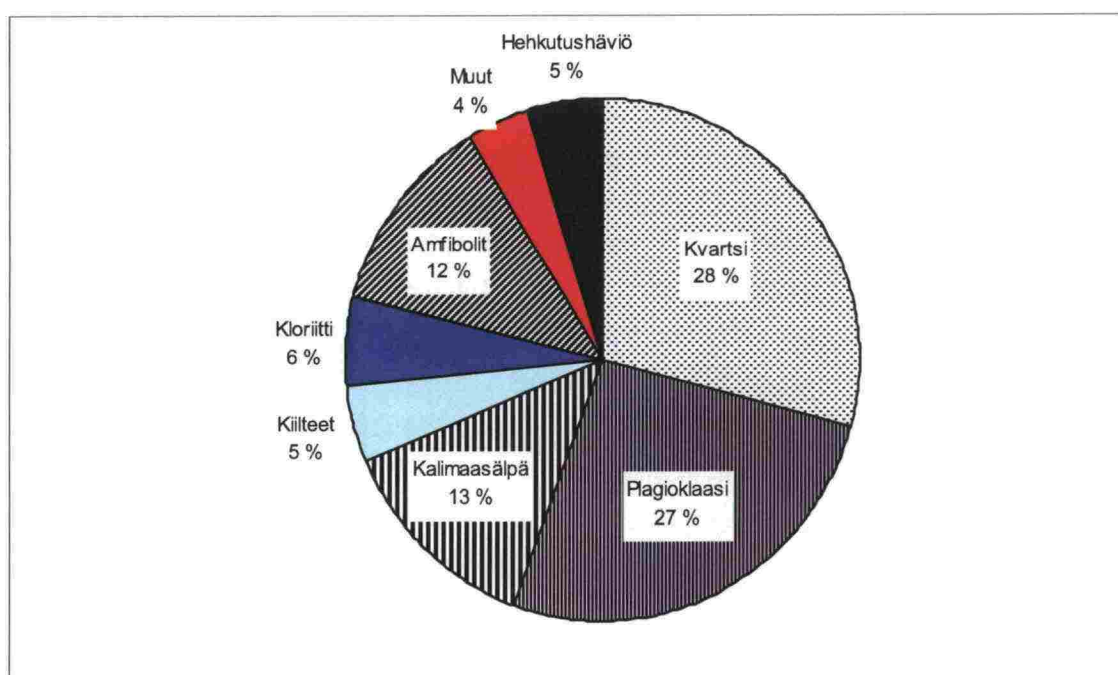


Kuva 4.18. Röntgendiffraktioanalyysiin perustuvat suuntaa-antavat arviot mineraalien suhteellisista osuuksista soranäytteiden, käyttämättömien kalliomurskeiden ja vertailu-mineraalien hienoaineksissa

Kloriittipitoisten näytteiden rapautumisen osalta ratkaiseva, mutta hankala kysymys on se, onko kloriitti muodostunut kiviaineksen geologisen iän aikana vuosituhansien kuluessa vai suuren raepinta-alan johdosta biotiitin tai amfibolien rapautumisessa geologiseen ikään nähden lyhyenä käyttöaikana murskeen tuotannon jälkeen. Vastaava kysymys pätee savimineraalien synnyn suhteen, jolloin lähtöaineksena ovat ainakin teoriassa saattaneet olla myös maasälvät. On selvää, että ainakin osa havaituista kloriiteista on vuosituhansien kuluessa syntyntä, kivessä jo murskausvaiheessa ollutta, mutta toisaalta ei voida osoittaa, että varsinkaan mekaanisesti hienorakeiseksi muuttunut biotiitti tai amfibolit eivät olisi murskauksen jälkeisinä vuosikymmeninä voimakkaasti tehostuneissa rapautumisolosuhteissa rapautuneet. Itse asiassa näytteen Tmj-Raa 714+600 kohdalla tämä todettiin ohutietarkastelussa biotiitin osalta tapahtuneeksi jopa joissakin karkeammissa rakeissa (vrt. 4.3.1 ja liite 2). Käytännössä pohdinnan mukaisen kemiallisen rapautumisen merkitys mahdollisesti tapahtuessaan riippuu siitä, saako muuttuminen aikaan *karkeiden sepelipartikkeleiden* lujuuden olennaisen heikkenemisen vai rajoittuuko se oleellisilta osin ainoastaan mekaanisesti hienontuneissa hienorakeisissa lajitteissa tapahtuvaksi. Lujuuden heikkeneminen olisi luonnollisesti pitkällä aikajänteellä mekaanista hienonemista edistävää, mutta havaintojen perusteella sitä ei

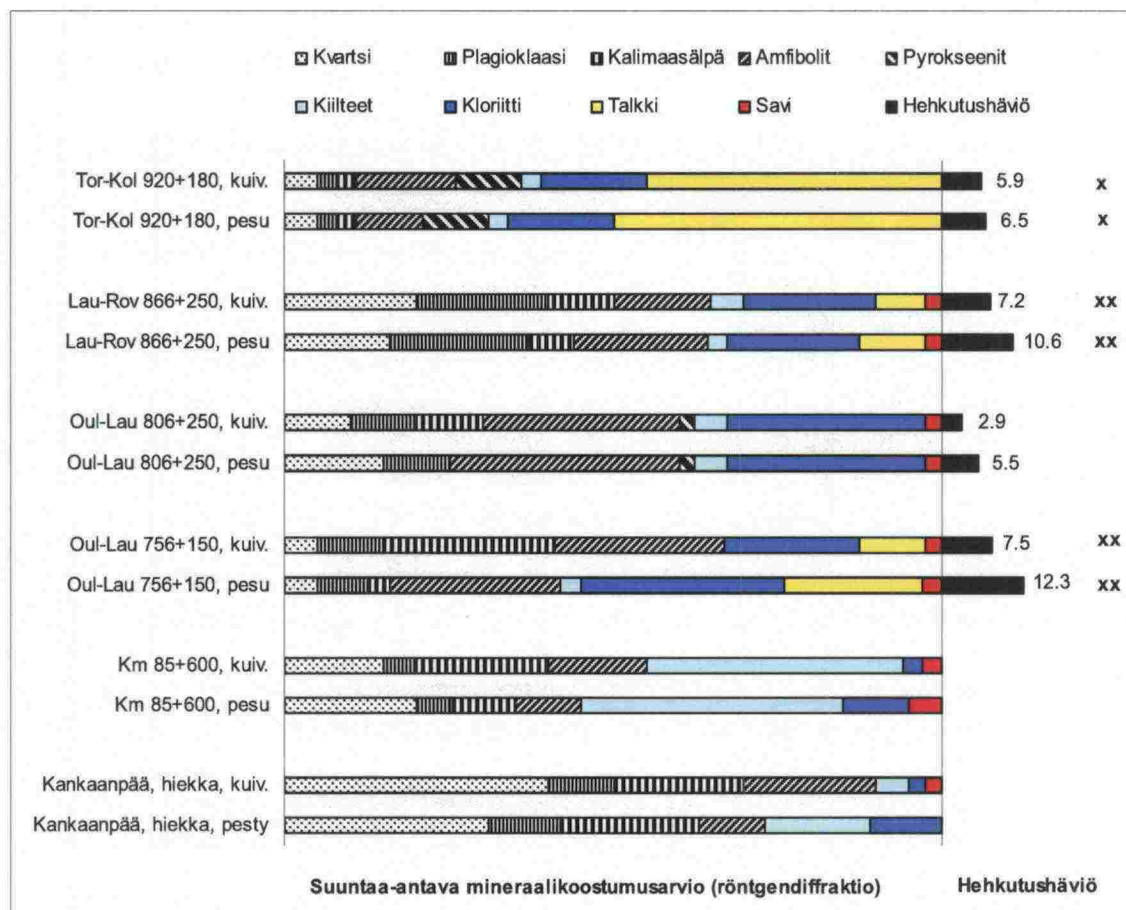
ole tukikerrosnäytteissä ainakaan yleisessä tapauksessa merkittävästi tapahtunut. *Hienorakeisen aineksen* mahdollinen rapautuminen saattaisi jossain määrin lisätä sen vahingollisuutta kiviaineksen toimintakyvyn heikentäjänä, mutta kuitenkin on muistettava, että mahdollisesti tapahtuessaankin herkintä muuttumaan on vain osa hienoaineksesta.

Tukikerrosmateriaalien hienoainesten mineralogian yleistilannetta voidaan karkeasti arvioida kuvan 4.19 mukaisesti. Kovat kivimineraalit; kvartsi, maasälvät ja amfibolit muodostivat keskimäärin peräti 80 % tutkittujen 35 tukikerrosnäytteen hienoaineksista. Tätä voidaan edellä esitetyn perusteella pitää kemiallisen rapautumisen vastustuskykyä ajatellen hyvänä asiana, joskin näidenkin mineraalien muuttumisprosessin alkaminen on kvartsia lukuun ottamatta mahdollista.



Kuva 4.19. Tarkasteltujen 35 tukikerrosnäytteen hienoainesten suuntaa-antava keskimääräinen mineraalikoostumus röntgendiffraktioanalyysien perusteella.

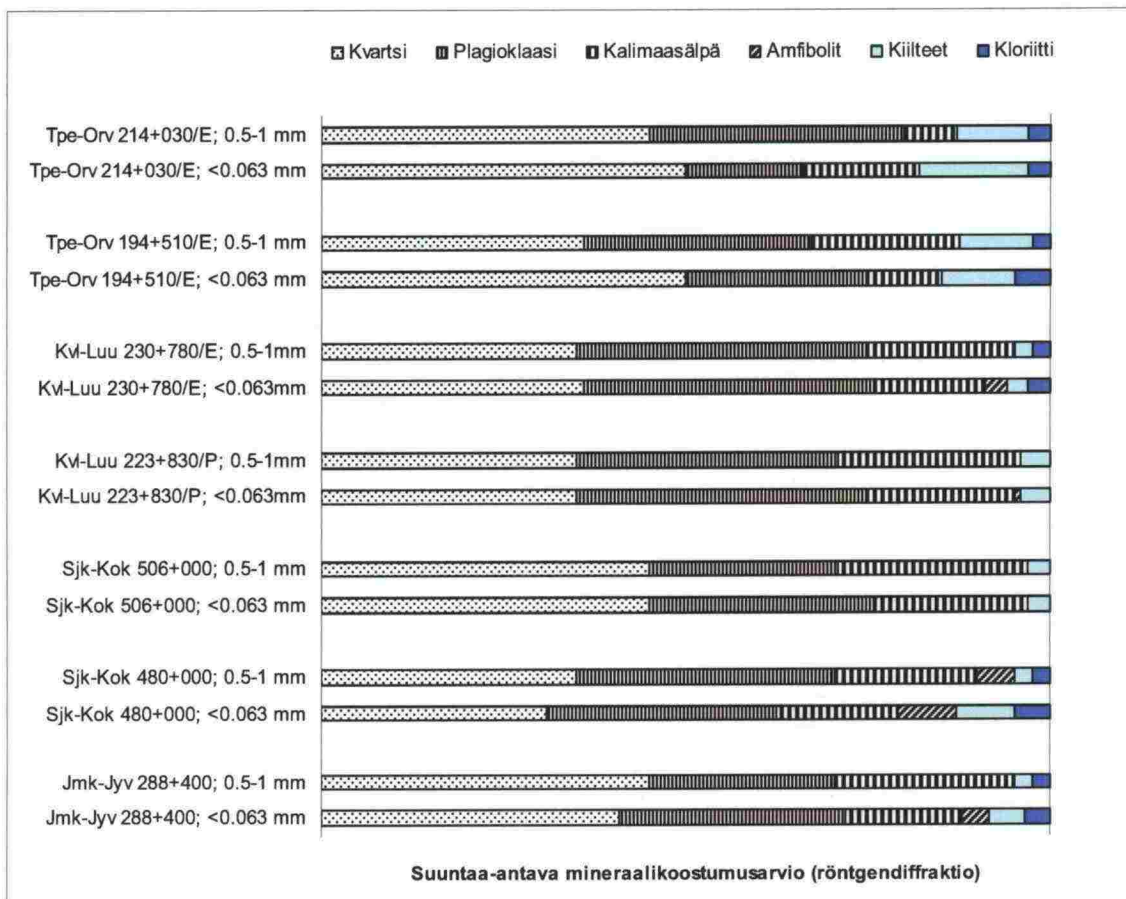
Kuivaseulonnassa ja vasta sen jälkeisessä pesussa irronneiden hienoainesten mineraalisuhteissa ei, ehkä hieman yllättäenkin, todettu systemaattista eroa (kuva 4.20). Tosin joissakin kiviaineksissa, erityisesti näytteessä Oul-Lau 756+150 ja Kankaanpään hiekassa, kiilteen, kloriitin ja talkin määrä arvioitiin pesussa irronneessa hienoaineksessa jonkin verran suuremmaksi kuin seulonnassa irronneessa hienoaineksessa. Yleisesti ottaen tarkastelluissa näytteissä karkeampien rakeiden pinnoille tiukimmin kiinnittyvän hienoaineksen ei kuitenkaan voitu todeta olevan mineraalikoostumukseltaan systemaattisesti valikoitunutta.



Kuva 4.20. Kuivaseulonmassa ja sen jälkeisessä pesussa irronneiden hienoainesten mineraalikoostumusten ja hehkutushäviöiden vertailua. x,xx: ks. kuva 4.17.

Kuvassa 4.21 on vertailtu lajitteesta 0.5/1 mm ja hienoaineksesta röntgendiffraktioanalyysillä arvioituja mineraalikoostumuksia. Tarkastelluissa näytteissä erot lajitteiden välillä ovat varsin vähäisiä. Tilanne oli vastaava myös yksittäisistä Tpe–Orv-osuuden näytteistä tutkituissa karkeammissa lajitteissa. Tämä ilmentää toisaalta sitä, että hienoaines on ilmeisimmin lähtökiviaineksesta mekaanisesti irronnutta ja toisaalta sitä, että tarkastelluissa kiviaineksissa ei ole ollut merkittävässä määrin erityisen heikkoja mineraaleja, jotka olisivat voimakkaasti rikastuneet hienoainekseen. Kiviainekset ovat keskenään melko samantyyppisiä rapautumiskestävien kvartsin ja maasälpjen muodostaessa kiviaineksesta erittäin suuren osan, mistä syystä havainnot eivät ole yleistettävissä koskemaan runsaasti tummia tai pehmeitä mineraaleja sisältäviin kiviaineksiin.

Luvussa 4 ja kirjallisuudessa esitettyjen havaintoihin pohjautuvat suositukset rata-rakenteessa käytettävien murskattujen kalliokiviainesten mineralogialle on esitetty luvussa 7.1.



Kuva 4.21. Hienoaineksen ja lajitteen 0.5-1 mm röntgendiffraktioanalyysien vertailua.

4.4.2 Orgaaninen aines ja rautasaostumat

Edellä esitetyssä kuvassa 4.17 on nähtävissä myös näytteiden hehkutushäviöt (vrt. luku 3.2.6). Yleisenä huomiona hienoainesten hehkutushäviöistä on todettava niiden olevan pääosassa näytteitä varsin suuria, keskimäärin 5.1 %. On huomattava, että vuosikymmenten saatossa pinnaltaan avoimeen tukikerrokseen kerääntyy kaikki tuulen kuljettama, ratapölkystä irtoava ja etenkin aiempina vuosina myös vaunuista pudonnut orgaaninen aines. Jäljempänä (luku 4.4.3) todetaan, että havaituilla pitoisuuksilla orgaanisella aineksella on olennaista merkitystä veden sitoutumisessa tukikerrokseen.

Kaikissa neljässä tarkastellussa näytteessä hehkutushäviö oli pesussa irronneessa hienoaineksessa suurempi kuin seulonnassa irronneessa hienoaineksessa. Havainto viestii siitä, että jotkin orgaaniset ainekset kiinnittyvät karkearakeisten partikkelien pinnoille tiukemmin kuin mineraalinen hienoaines.

Kloriitin ja savimineraalien ohella rautasaostumien esiintyminen tukikerrosnäytteissä saattaa olla merkki niiden kemiallisesta rapautumisesta. Rautapitoisuutta indikoi hienoaineksen punertava väri (vrt. kuva 4.22). Rautayhdisteitä voidaan havaita myös röntgendiffraktioanalyysissä silloin, kun ne ovat riittävästi kiteytyneitä. Muussa tapauksessa niiden paljoussuhteiden selvittäminen edellyttää kemiallista analyysiä. Sekä röntgendiffraktion että värin perusteella tutkituissa kiviaineksissa näytteen Tmj-Raa 714+600 arvioitiin sisältävän varsin runsaasti rautaa. Hienoaines oli väriltään punertavan ruskeaa ja hehkutuksen jälkeen verraten kirkkaan punaista (kuva 4.22). Tarkasteltaessa näytteen

karkeampia rakeita niiden voitiin silmämääräisestikin havaita olevan selvästi rapautuneita ja pestynäkin kauttaaltaan punertavan ruskean aineksen pinnoittamia (vrt. kuvat 4.7 ja 4.8). Röntgendiffraktioanalyysissä rautayhdisteitä arvioitiin esiintyvän selvästi myös etenkin Tuomioja–Raahe-rataosan toisessa näytteessä km 703+170 sekä näytteessä Kuo–Iis 518+837 (vrt. kuva 4.17), mikä saattaa ilmentää raudan esiintymistä näytteissä. Myös värin perusteella arvioituna kyseiset näytteet olivat punertavimpien joukossa.

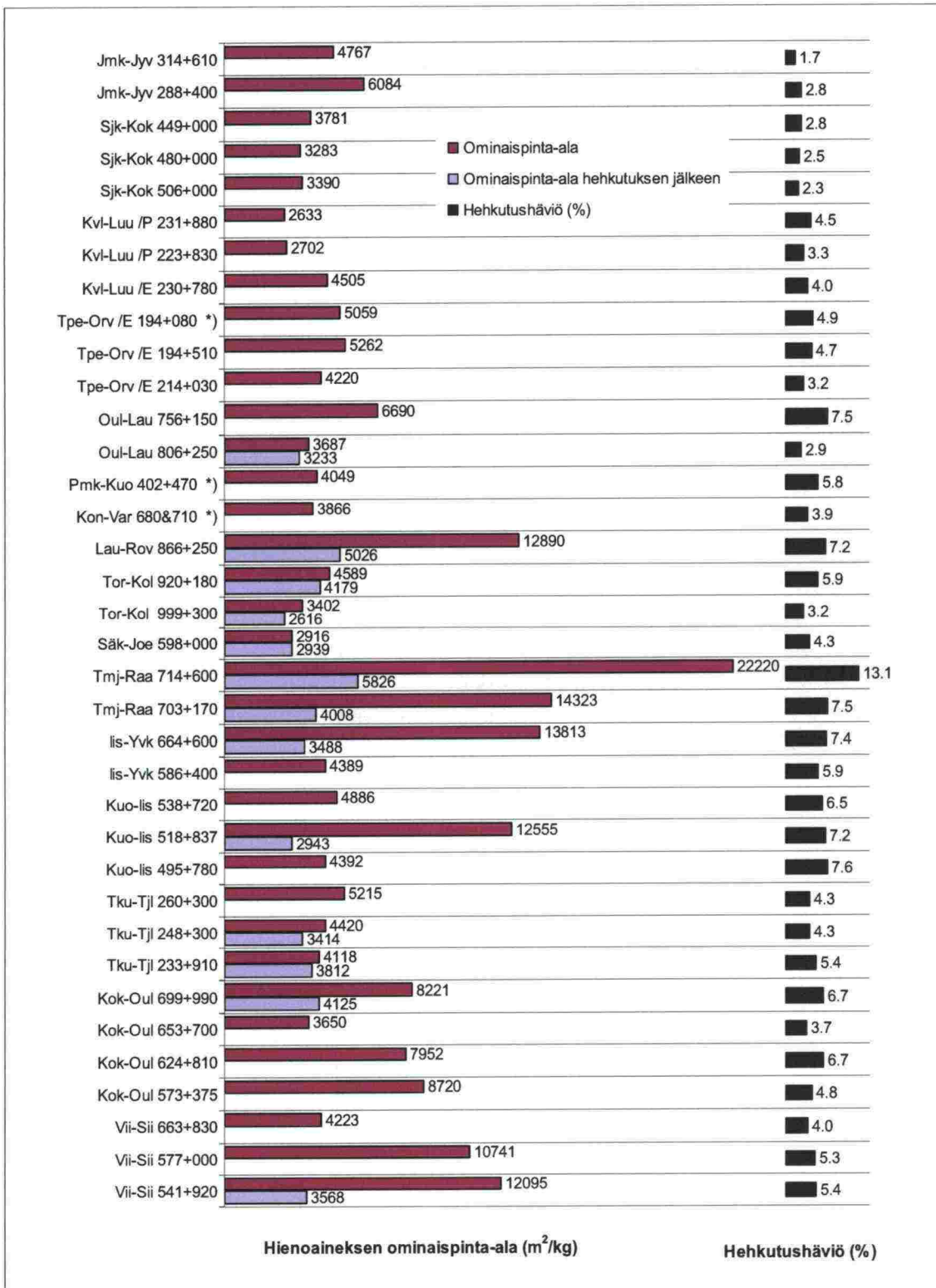
Hehkutushäviöllä ja rautasaostumilla on merkitystä hienoaineksen laadun vaikutusten arvioinnissa sikäli, että orgaaniseen ainekseen ja rautasaostumiin sitoutuvan veden vaikutukset on havaittu (mm. Nieminen, 1985) mineraaliseen ainekseen sitoutuvaan veteen verrattuna poikkeaviksi.



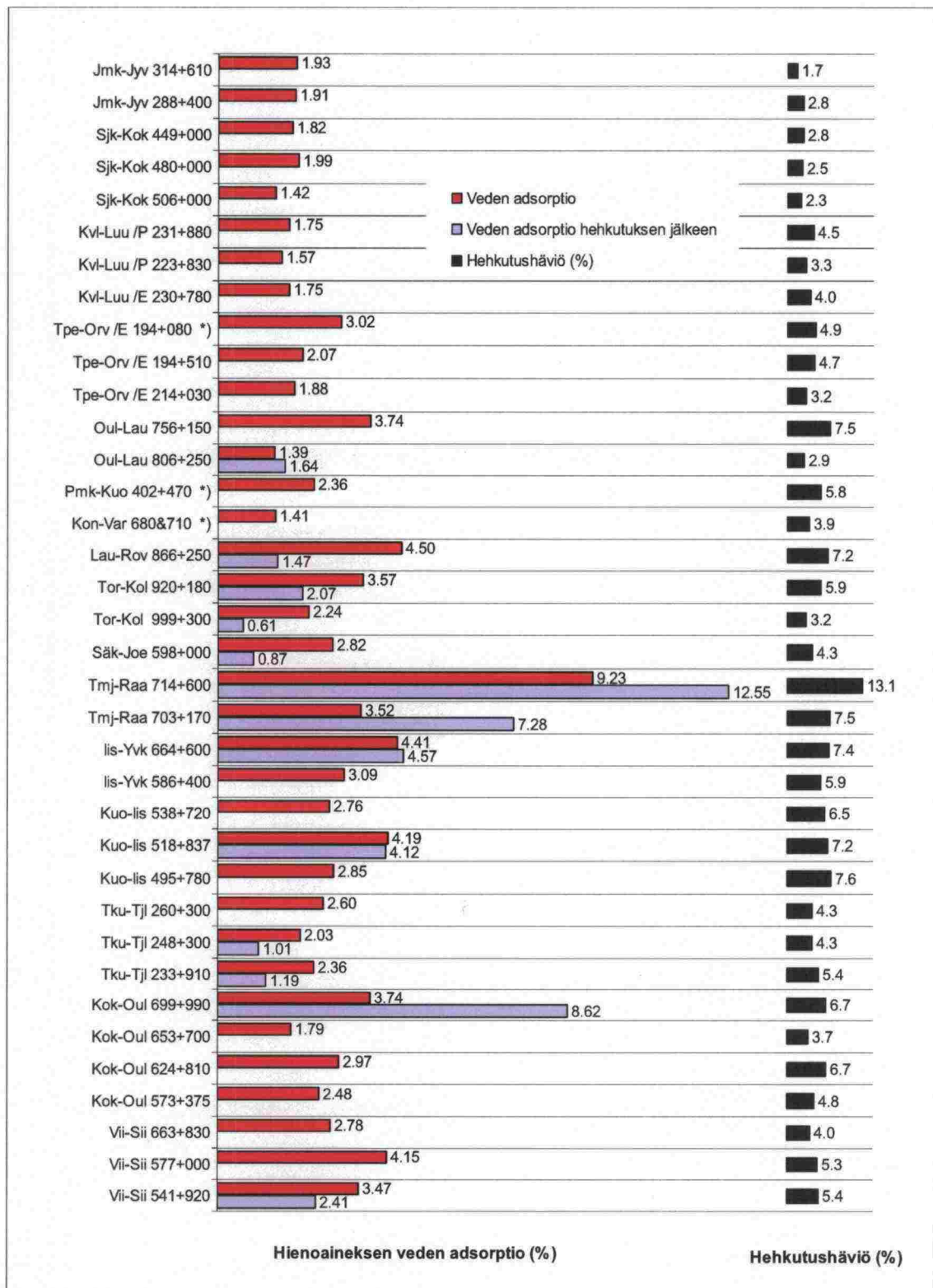
Kuva 4.22. Tukikerrosnäytteiden hienoainesten värit ennen hehkutusta (oikealla) ja hehkutuksen jälkeen (vasemmalla).

4.4.3 Ominaispinta-ala ja vesihöyryn adsorptio

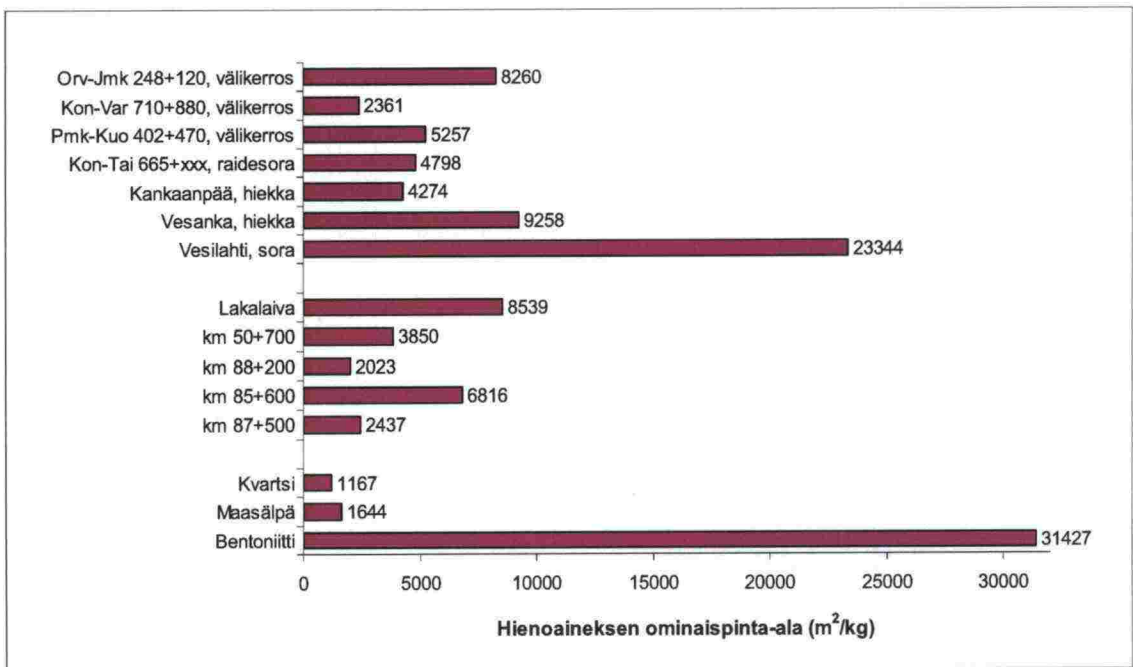
Tukikerrosnäytteiden hienoaineksista määritetyt ominaispinta-alat (vrt. luku 3.2.3) on esitetty kuvassa 4.23 ja veden adsorptiot (vrt. luku 3.2.4) vastaavasti kuvassa 4.24. Vertailumateriaalien osalta vastaavat tulokset on esitetty kuvissa 4.25 ja 4.26. Tarkasteltujen 36 tukikerrosnäytteen ennen hehkutusta määritettyjen ominaispinta-alojen keskiarvo oli $6500 \text{ m}^2/\text{kg}$ ja veden adsorptioiden vastaavasti 2.8 %.



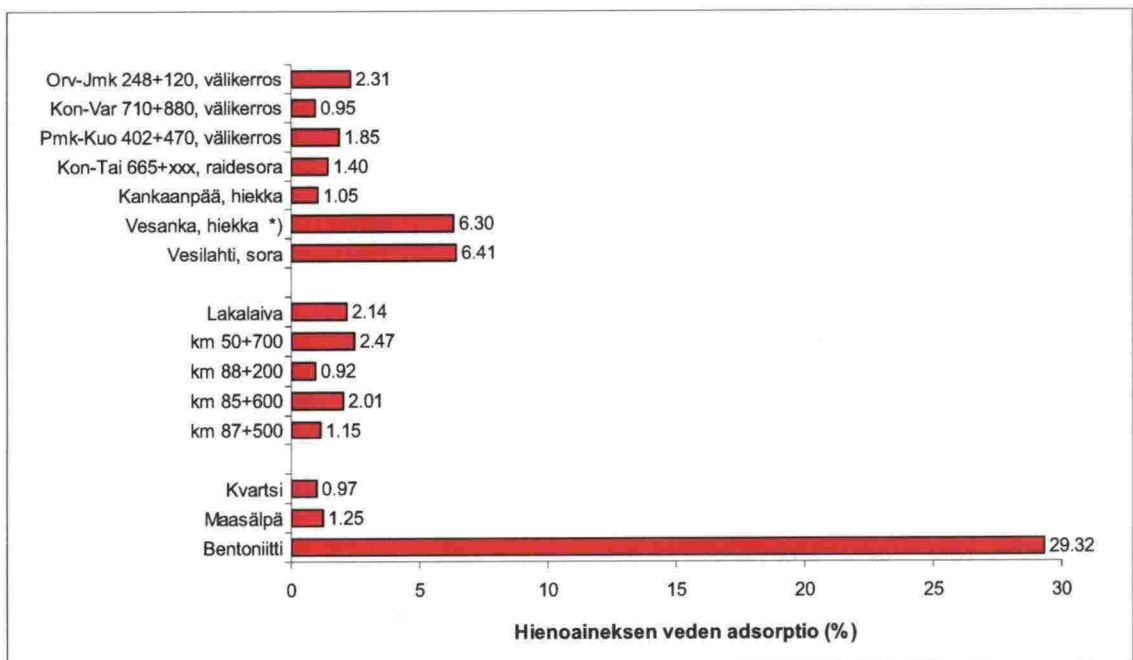
Kuva 4.23. Tukikerroksnäytteiden (kuivaseulonnassa irronneiden) hienoainesten ominaispinta-alat ennen ja jälkeen hehikutuksen sekä hienoainesten hehikutushäviöt. *) näyte sisältää myös pesussa irronneen hienoainosesosuuden.



Kuva 4.24. Tukikerrosnäytteiden (kuivaseulonassa irronneiden) hienoainesten veden adsorptiot ennen ja jälkeen hehkutuksen sekä hienoainesten hehkutushäviöt. *) näyte sisältää myös pesussa irronneen hienoainesosuuden. Hehkutus mitä ilmeisimmin vääristää mineraalisen aineksen veden adsorptio-ominaisuuksia.



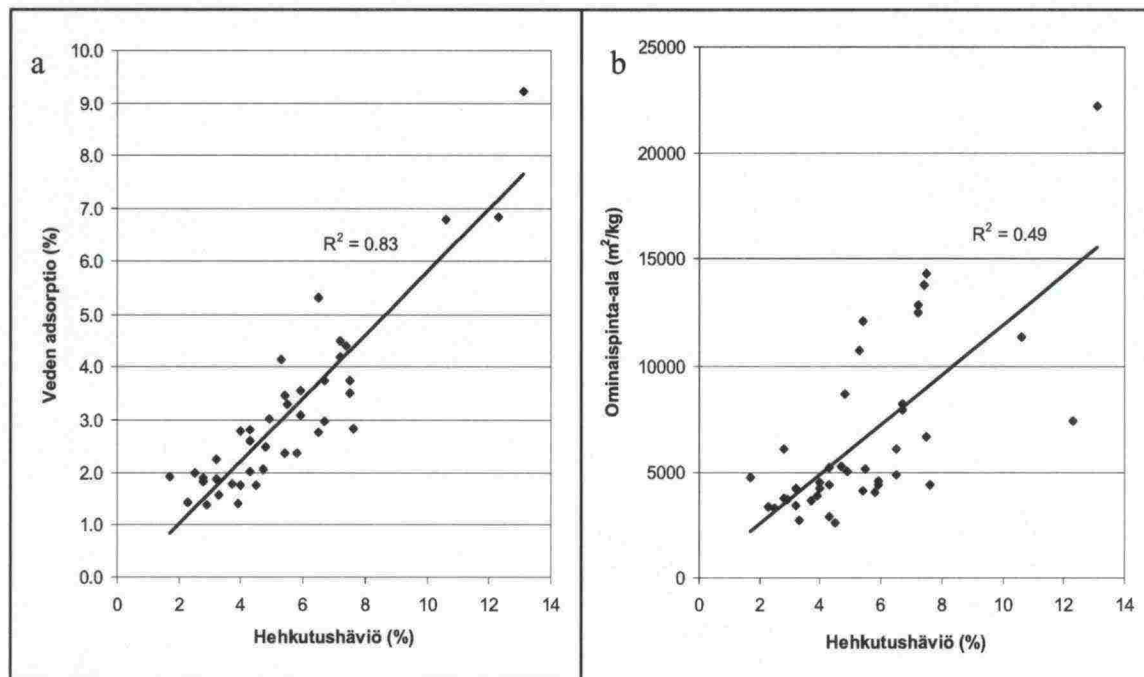
Kuva 4.25. Vertailunäytteinä toimineiden luonnonmaalajien ja uusien murskeiden (kuiva-seulonnassa irronneiden) hienoainesten ominaispinta-alat.



Kuva 4.26. Vertailunäytteinä toimineiden luonnonmaalajien ja uusien murskeiden (kuiva-seulonnassa irronneiden) hienoainesten veden adsorptiot. *) Vesangan näyte sisältää myös pesussa irronneen hienoainepitoisuuden.

Yleisenä silmiinpistävänä huomiona ominaispinta-alojen ja veden adsorptioiden havaitaan vaihtelevan erittäin runsaasti. Useat tukikerrosnäytteet omaavat hyvin suuren ominaispinta-alan ja veden adsorption, samoin kuin osa sora- ja hiekanäytteistä. Kuvista 4.23 ja 4.24 tukikerrosnäytteiden osalta ominaispinta-alan ja veden adsorption havaitaan jossain määrin mukailevan näytteiden hehkutushäviöitä. Yhteyksiä havainnollistavasta kuvasta 4.27 on nähtävissä, että hehkutushäviö määrittelee käytännössä hyvin pitkälti tukikerrosnäytteiden veden adsorption. Lineaarisen

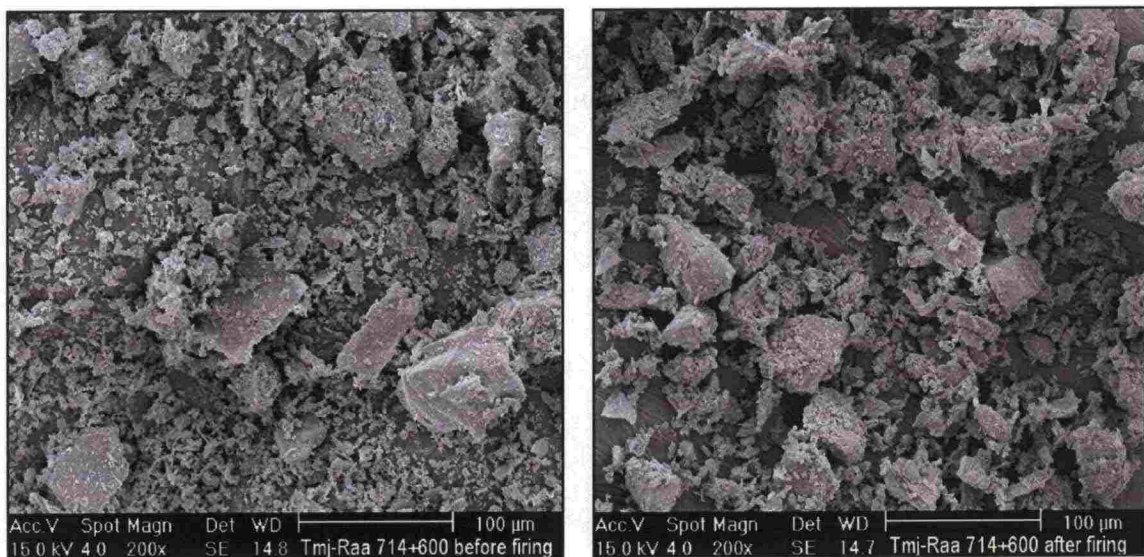
riippuvuuden mukainen selitysaste (R^2) saa arvon 0.83. Ominaispinta-alaan hehkutushäviön yhteys on heikompi ja selitysaste vastaavasti 0.49. Erityisen huomattavaa merkitystä ominaispinta-alaan ja veden adsorptioon hehkutushäviöllä vaikuttaisi olevan sen suuruuden ylittäessä 4 %.



Kuva 4.27. Tukikerrosnäytteiden hienoainesten vesihöyryn adsorption (a) ja ominaispinta-alan (b) korrelaatio hehkutushäviöön.

Hienoainoksen veden adsorptio korreloi jonkin verran myös alle 0.02 mm lajitteen määrään hienoaineksessa. Lineaarisen riippuvuuden mukainen selitysaste (R^2) saa tarkastelussa arvon 0.27 ja jätettäessä trendistä poikkeavat rataosan Tmj–Raa näytteet huomioimatta arvon 0.38.

Hehkutuksen vaikutus tukikerrosnäytteiden ominaispinta-aloihin on nähtävissä kuvassa 4.23. Ennen hehkutusta suuren ominaispinta-alan omanneiden näytteiden ominaispinta-alat ovat hehkutuksen jälkeen pienentyneet oleellisesti. Näin ollen hehkutuksessa häviävällä orgaanisella aineksella täytyy olla saman näytteen muuhun (mineraaliseen) ainekseen verrattuna selvästi suurempi ominaispinta-ala. Eron täytyy olla todella huomattava, koska jo noin 7 % hehkutushäviön vaikutuksesta ominaispinta-ala pienentyi useissa näytteissä vain neljännekseen alkuperäisestä. Hehkutuksen vaikutus ominaispinta-alaan havainnollistuu ennen ja jälkeen hehkutuksen otetuissa näytteen Tmj–Raa 714+600 hienoaineksista pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvissa (kuva 4.28), joista havaitaan kaikkein hienorakeisimpien partikkeleiden vähentynyt määrä hehkutuksen jälkeen.

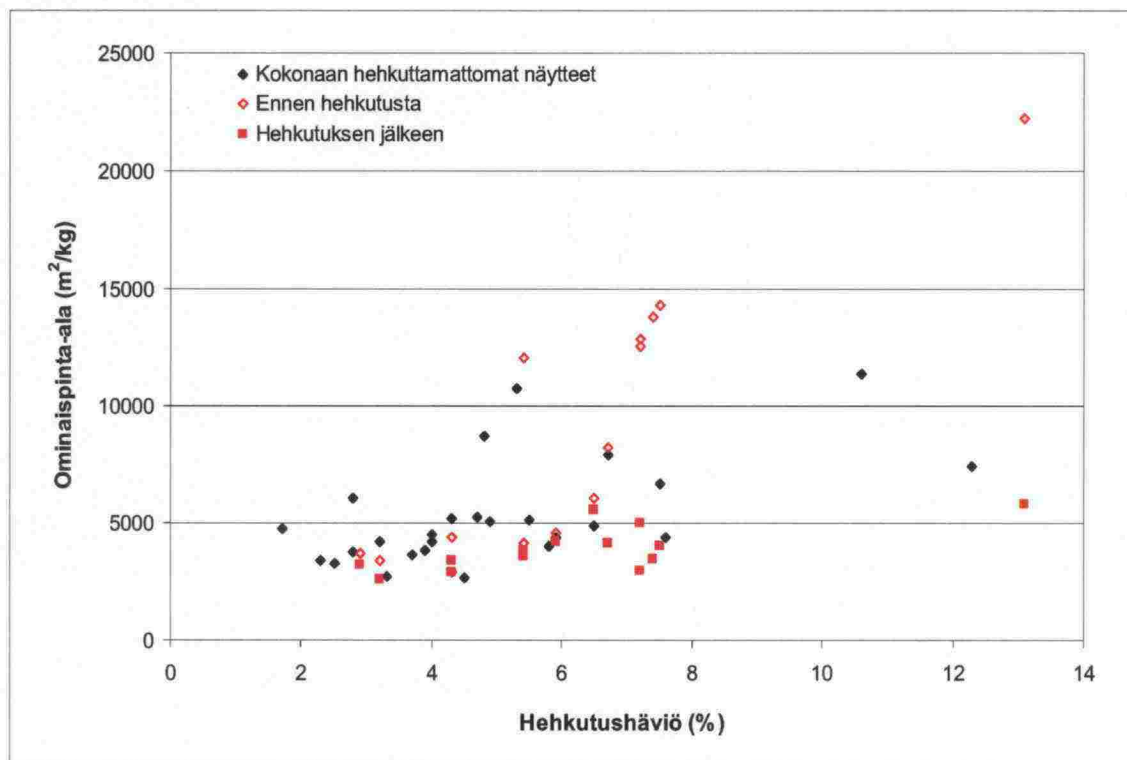


Kuva 4.28. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvat (SEM-kuvat) näytteen Tmj-Raa 714+600 hienoaineksesta ennen (vasemmalla) ja jälkeen (oikealla) hehkutuksen.

Se, että hehkutushäviö ei ole yleisesti kovin hyvin verrannollinen tukikerrosnäytteiden ominaispinta-alaan (kuva 4.27b) saattaa johtua orgaanisen aineksen laadunvaihteluista. Toisen näytteen sisältämä humusaines voi olla enemmän ominaispinta-alaa kasvattavaa kuin jonkin toisen näytteen orgaaninen aines. Ajatusmallia tukee se, että kaikkien hehkutettujen aineiden ominaispinta-alat asettuvat suhteellisen hyvin samalle tasolle huolimatta ennen hehkutusta määritettyjen ominaispinta-alojen suuristakin eroista, kuten kuvasta 4.29 käy hyvin ilmi. Samalle tasolle hehkutuksen jälkeen asettuvat ominaispinta-alat puolestaan viestivät mineraalisten (kiviperäisten) hienoainesten keskenään suhteellisen samantyyppisistä ominaisuuksista. Hehkutuksen jälkeiset ominaispinta-alat tarkastelluissa 14 tukikerrosnäytteessä olivat välillä $2600\text{--}5900\text{ m}^2/\text{kg}$ (keskiarvo $3800\text{ m}^2/\text{kg}$), kun ne samoilla näytteillä ennen hehkutusta olivat välillä $2900\text{--}22200\text{ m}^2/\text{kg}$ (keskiarvo $9200\text{ m}^2/\text{kg}$). Hehkutuksen jälkeinen taso on suhteellisen alhainen, kun sitä verrataan esimerkiksi mitä ilmeisimmin rapautuneisiin luonnollisiin maalajeihin, Vesilahden soraan ($23300\text{ m}^2/\text{kg}$) ja Vesangan hiekkaan ($9300\text{ m}^2/\text{kg}$), tai toisaalta hyvin kiillepitoisiin uusiin murskeisiin, Lakalaivaan ($8500\text{ m}^2/\text{kg}$) ja km 85+600:iin ($6800\text{ m}^2/\text{kg}$). Tämä voidaan tulkita viitteeksi siitä, että tukikerrosnäytteiden sepeliperäinen hienoaines oli tarkastelluissa näytteissä rakenteeltaan melko ehjää ja rapautumatonta. Edellisessä mineralogialuvussa esitettyyn pohdintaan viitaten tukikerrosnäytteiden kemiallinen muuttuminen vaikutti siten esimerkiksi rapautuneisiin soriin suhteutettuna melko vähäiseltä myös kaikkein hienorakeisimmassa aineksessa.

Veden adsorption osalta vastaavaa hehkutuksen pienentävää vaikutusta ei voida kuvasta 4.24 havaita. Joidenkin näytteiden veden adsorptiot pienenevät hehkutuksen vaikutuksesta alle kolmannekseen alkuperäisestä, mutta joidenkin toisten näytteiden veden adsorptiot yli kaksinkertaistuivat hehkutuksen vaikutuksesta. Ainoana mahdollisena selityksenä havainnoille on se, että hehkutus on jollakin tavalla vääristävästi muuttanut mineraalisen aineksen veden adsorbointiominaisuuksia. Joka tapauksessa kuvan 4.27a perusteella on selvää, että yli 4 % hehkutushäviöllä orgaanisella aineksella on määräävä vaikutus tukikerrosnäytteiden veden adsorptioon. Osaltaan tämä vaikutus korostuu johtuen tukikerrosnäytteiden mineraalisen

hienoaineksen ominaispinta-alan melko alhaisesta tasosta ja suhteellisen suuresta tasalaatuisuudesta.

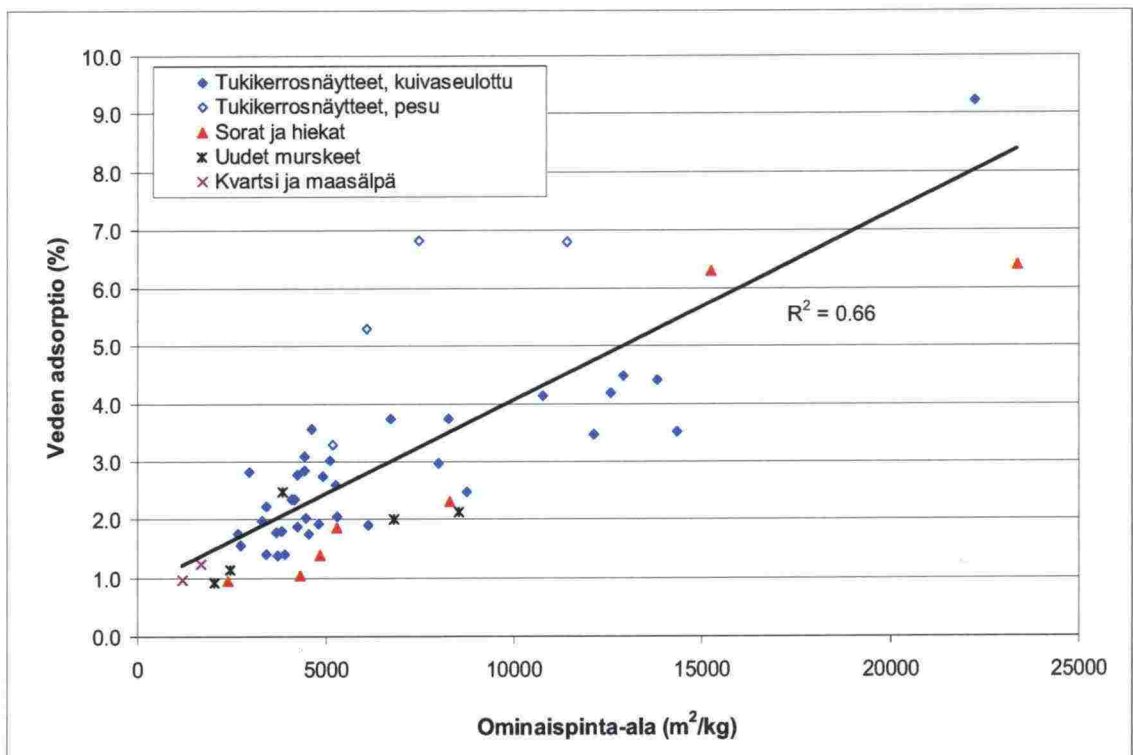


Kuva 4.29. Tukikerrosnäytteiden hienoainesten ominaispinta-alat hehikutushäviöiden suhteen sekä hehkutettujen näytteiden ominaispinta-alojen yleistason havainnointi.

Tukikerrosnäytteiden hienoaineksia voidaan tarkastella kahdesta näkökulmasta. Orgaaninen aines tulee huomioida, kun tarkastellaan koko tukikerroksen hienoaineksen ominaisuuksia. Toisaalta arvioitaessa hienoaineksen ominaisuuksien perusteella sepelikiviaineksen hienonemista orgaaninen aines tulisi kyetä rajaamaan tarkasteltavan hienoaineksen ulkopuolelle. Toisaalta tukikerrokseen tehokkaasti vettä sitova orgaaninen aines edistää hienonemisen kehittymistä jatkossa. Tästä syystä *tukikerrosaineksen ominaisuuksien kuvaamiseen* soveltuu hyvin ennen humuspolttua tehtävä veden adsorptio määrittäminen, jota ominaispinta-alamäärittäminen voi täydentää. *Kiviaineksen hienonemiskäyttäytymisen arvioimiseksi* mineraalisen hienoaineksen ominaisuuksia voidaan tarkastella hehkutetun näytteen ominaispinta-alasta. Mineraalisen aineksen veden adsorptio-ominaisuuksia hehkutus sitä vastoin ilmeisesti vääristää ainakin tässä yhteydessä käytetyssä 800 asteen lämpötilassa operoitaessa. Tutkimusaineiston keskiarvoon (2.8 %) ja havaittuihin vaihteluihin perustuen voidaan todeta, että mikäli ennen hehkutusta tehdyn veden adsorptiokokeen tulos on yli 4 %, näytteen hienoainesta voidaan pitää laadultaan selvästi tavanomaista tukikerroshienoainesta enemmän vettä adsorboivana. Toisaalta edellisessä luvussa todettuun näytteen Tmj-Raa 714+600 selvään rapautumiseen peilaten, kiviaineksen rapautumista tai tavanomaista vahingollisempaa mineraalisen hienorakeisen aineksen laatua on aihetta tarkastella vakavasti ainakin silloin, kun hehkutetun näytteen ominaispinta-ala on suurempi kuin 5000 m²/kg. Eri tutkimusmenetelmät täydentävät toisiaan muodostaen yhdessä kokonaisuuden kiviaineksen hienonemisen ja tukikerroksen vedensitomiskyvyn arvioimiseksi.

Tukikerroshienoaineeksia näytekohtaisesti tarkasteltaessa selkeästi suurin vedenimu ja ominaispinta-ala ennen hehkutusta havaittiin näytteessä Tmj-Raa 714+600 ($22220 \text{ m}^2/\text{kg}$, 9.23 %), jossa toisaalta myös hehkutushäviö (13.1 %) oli selvästi suurin. Suuri, yli $10000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ominaispinta-ala havaittiin yhteensä seitsemässä tarkastelluista 36 tukikerrosnäytteestä. Veden adsorption suhteen Tuomioja-Raahe-rataosan näytteen jälkeen seuraavaksi suurin arvo oli näytteessä Lau-Rov 866+250, jossa adsorptio oli kuitenkin jo huomattavasti alhaisempi (4.50 %).

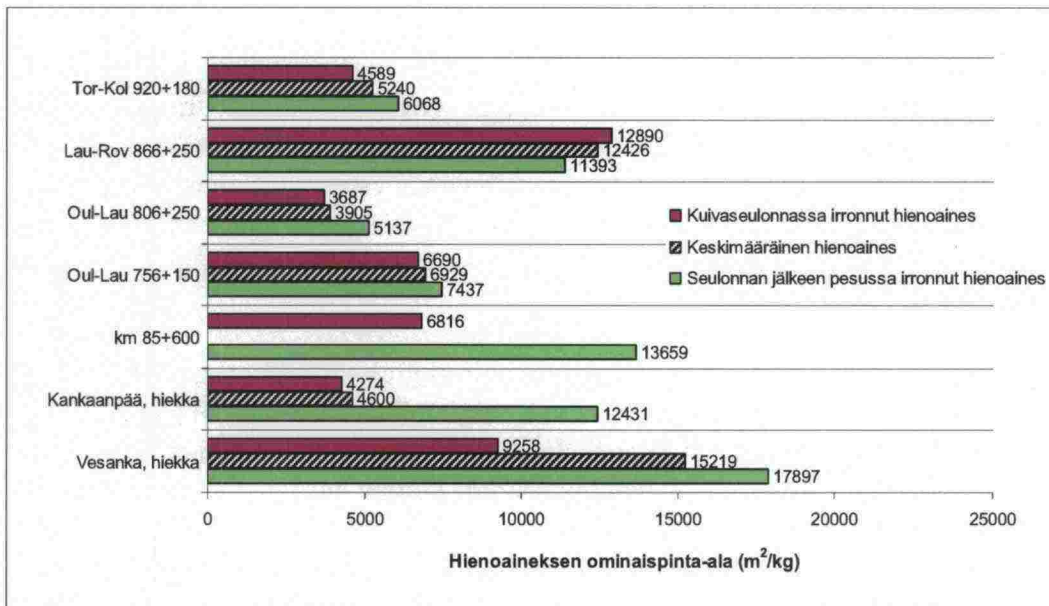
Veden adsorption ja ominaispinta-alan yhteys ei ole yksikäsitteinen (kuva 4.30). Tämä on osaksi luonnollinen seuraus siitä, että typen adsorptiona tehtävässä ominaispinta-alan määrittämisessä huomioimatta jää pienimmät huokoset hieman suurempaan huokoskokoon saakka kuin veden adsorptiossa (Nieminen, 1985). Lisäksi selittävänä tekijänä ovat varmasti myös erot tietyn ominaispinta-alan omaavien aineiden veden adsorbointikyvyissä ja siten partikkelien pinnoille veden adsorptiokokeissa sitoutuvien vesimolekyylikerrosten paksuuksissa. Kuvasta nähdään, kuinka esimerkiksi kaikkien vasta seulonnan jälkeisessä pesussa irronneiden tukikerroshienoainesten veden adsorptiot olivat niiden ominaispinta-alaan nähden keskimääräistä suuremmat. Näiden näytteiden hienoaineissa kaikkein hienoimman aineksen suhteelliset osuudet olivat keskimäärästä suuremmat (vrt. taulukko 4.1). Toisaalta vähiten kaikkein hienointa ainesta sisältäneet sora- ja hiekkanäytteet sijoittuvat kuvaajalle keskimääräiseen nähden päinvastaisesti.



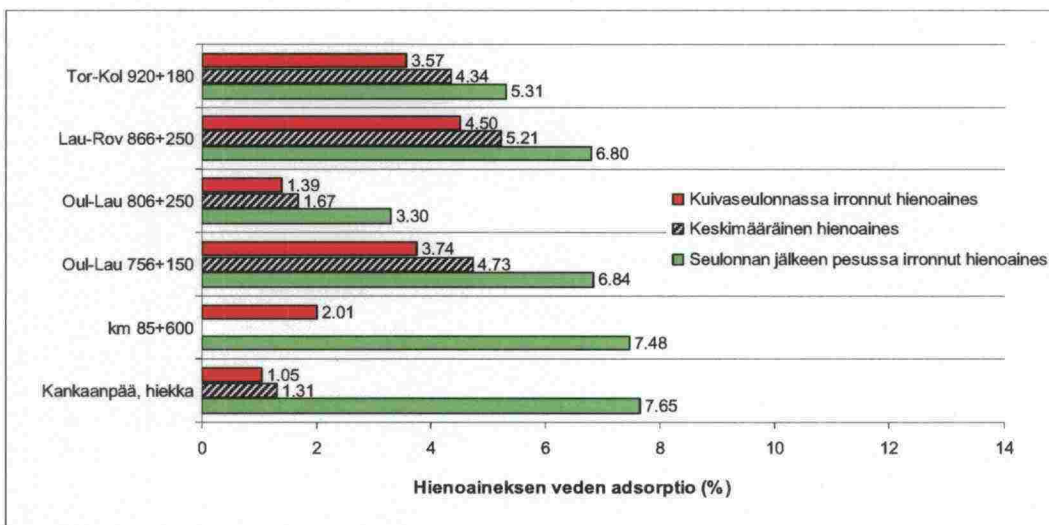
Kuva 4.30. Veden adsorption ja ominaispinta-alan korrelaatio (ilman bentoniittia).

Kuivaseulonnassa ja vasta sen jälkeisessä pesussa irronneiden aineiden ominaispinta-alaeroja on tarkasteltu kuvassa 4.31 ja veden adsorptio eroja vastaavasti kuvassa 4.32. Kuvissa on esitetty myös keskimääräiset arvot, jotka on laskettu eri vaiheissa irronneiden hienoainesten keskinäiset määräsuhteet huomioiden. Neljän tarkastellun tukikerrosnäytteen ominaispinta-alan osalta merkittävää systemaattista eroa eri

vaiheissa irronneen hienoaineksen välillä ei voitu havaita. Tukikerrosnäytteiden veden adsorptiot sitä vastoin olivat pesussa irronneessa näyteosassa vähintään puolet suurempia kuin seulonnassa irronneessa hienoaineksessa. Näytteen keskimääräiseen hienoainekseen verrattuna ero oli tietysti pienempi. Kankaanpään hiekassa sekä km 85+600 uudessa murskeessa erot seulonnassa ja pesussa irronneiden ainesten välillä olivat hyvin suuret sekä ominaispinta-alan että veden adsorption suhteen, mutta näissä näytteissä kuivaseulonnassa pääosa aineksesta irtosi kuivaseulonnassa (vrt. taulukko 4.3), jolloin pesussa saadun hienoaineksen vaikutus keskimääräisen hienoaineksen ominaisuuksiin oli vähäinen. Vesangan hiekassa ero ominaispinta-alassa oli merkittävä myös keskimääräistä hienoainesta ajatellen, sillä peräti 69 % näytteen hienoaineksesta irtosi vasta pesussa.



Kuva 4.31. Kuivaseulonnassa ja vasta sen jälkeisessä pesussa irronneiden hienoainesten ominaispinta-alojen vertailu.



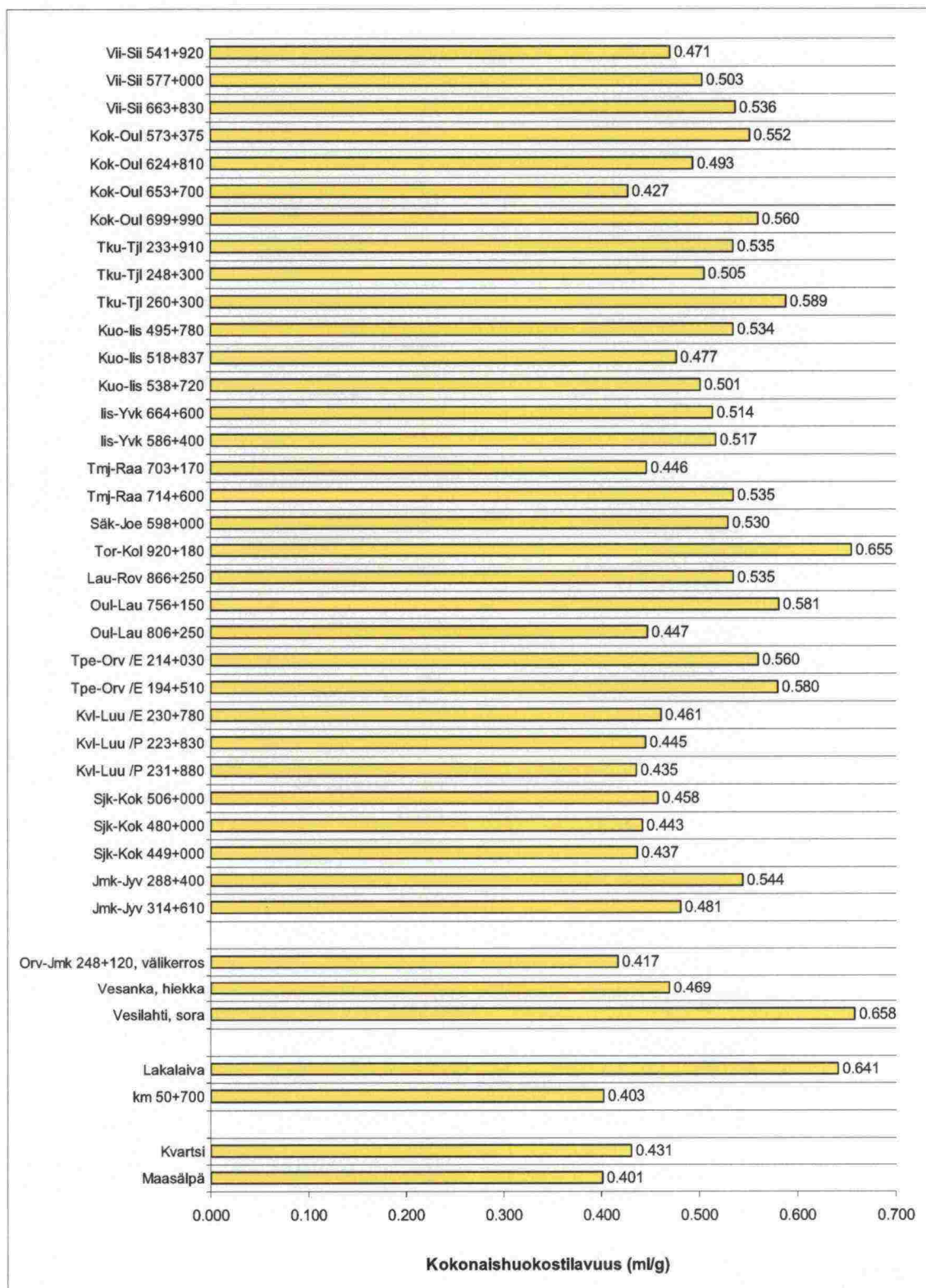
Kuva 4.32. Kuivaseulonnassa ja vasta sen jälkeisessä pesussa irronneiden hienoainesten veden adsorptioiden vertailu.

4.4.4 Huokoskokojakautuma ja pintarakenne

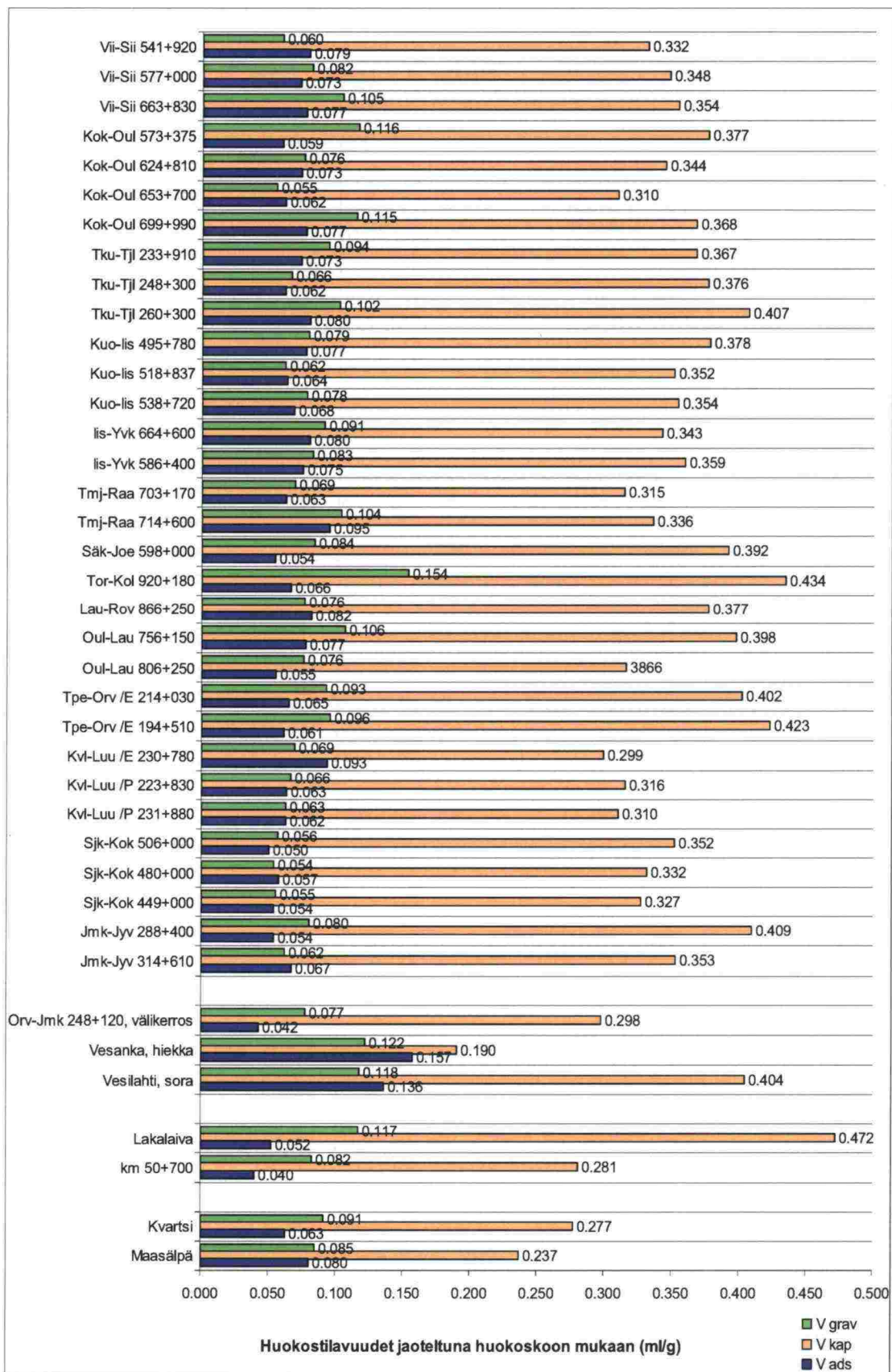
Näytteiden hienoainesten huokoskokojakautumia tarkasteltiin elohopeaporosimetrillä (ks. luku 3.2.5). Kuvassa 4.33 on esitetty kokeiden tuloksista määritetyt hienoainesten kokonaishuokostilavuudet. Keskimääräinen kokonaishuokostilavuus tarkastelluissa tukikerrosnäytteissä oli 0.51 ml/g. Kalliomurskeissa suurin huokostilavuus oli näytteessä Tor-Kol 920+180 (0.655 ml/g). Huokostilavuus oli selvästi keskimääräistä suurempi myös Lakalaivan (0.641 ml/g) kiviaineksessa sekä näytteissä Tku-Tjl 260+300 (0.589 ml/g), Oul-Lau 756+150 (0.581 ml/g) ja Tpe-Orv/E 194+510 (0.580 ml/g). Toisaalta on huomattava, että tulosten vaihteluväli oli kokonaisuudessaan melko pieni. Tarkastelluissa vertailunäytteissä huokostilavuus oli huomattavan suuri Vesilahden sorassa (0.658 ml/g).

Eri huokoskoalueiden vaikutus kokonaishuokostilavuuteen käy ilmi kuvasta 4.34. Kun huokokset jaotellaan Niemisen (1985) mukaan gravitaatio- ($>10\ \mu\text{m}$) kapillaari- ($1\text{...}10\ \mu\text{m}$) ja adsorptiohuokosiin ($0.006\text{...}1\ \mu\text{m}$), kuvista 4.34 ja 4.36 havaitaan kapillaarihuokosten muodostavan pääosan hienoainesten huokostilavuuksista. Huokosten seinämien kokonaispinta-ala (kuva 4.35) määräytyy sitä vastoin lähinnä kaikkein pienimpien adsorptiohuokosten perusteella (ks. kuva 4.36). Etenkin suuri huokospinta-ala saattaa siten indikoida rapautuneisuudesta.

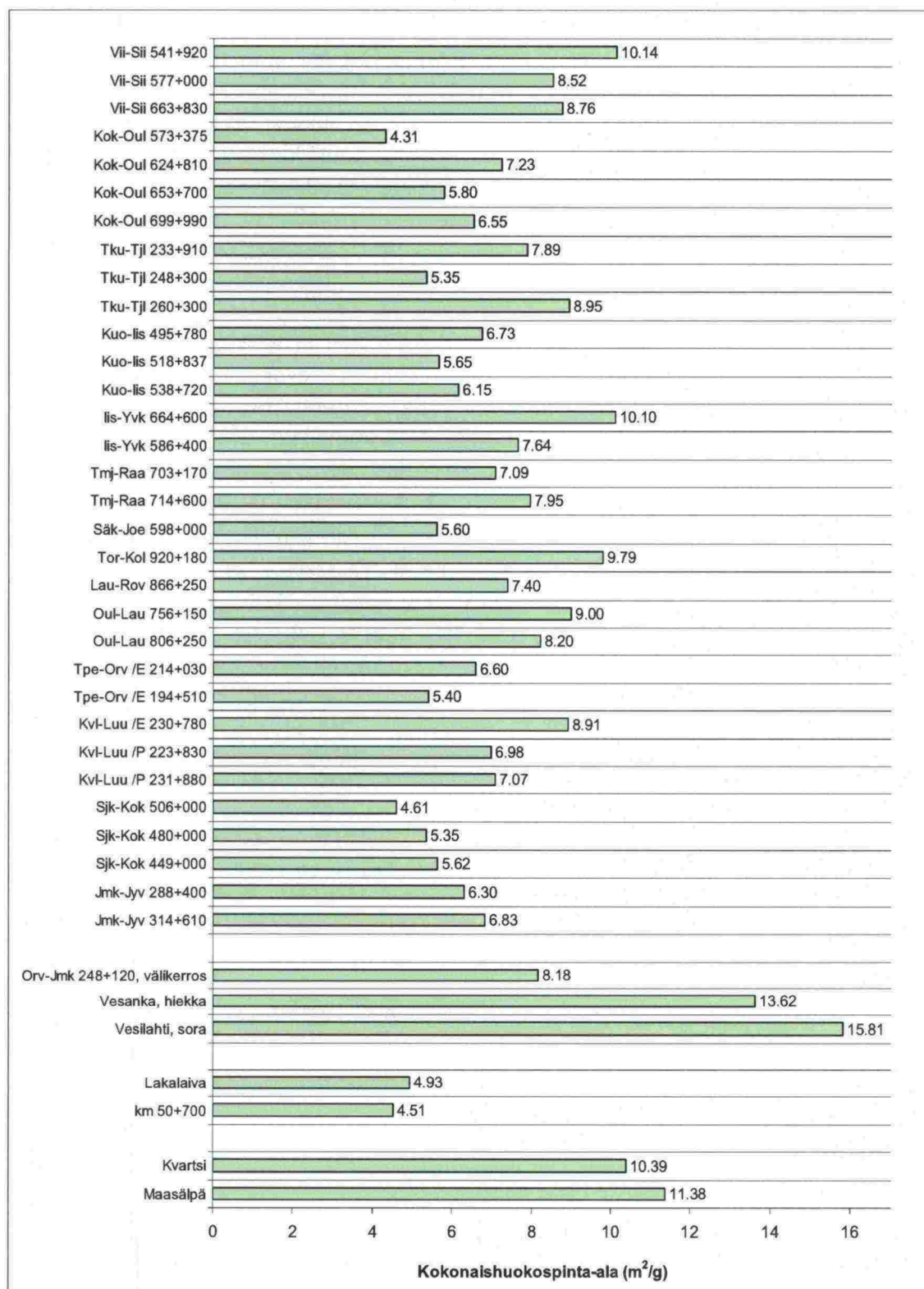
Keskimääräinen huokosten seinämien pinta-ala tarkastelluissa tukikerrosnäytteissä oli $7.1\ \text{m}^2/\text{kg}$. Suurimmat huokospinta-alat olivat näytteiden Vii-Sii 541+920 ($10.1\ \text{m}^2/\text{kg}$), Iis-Yvk 664+600 ($10.1\ \text{m}^2/\text{kg}$) ja Tor-Kol 920+180 ($9.8\ \text{m}^2/\text{kg}$) hienoaineksissa. Kuvasta 4.35 nähdään myös, että molempien tarkasteltujen uusien kalliomurskeiden, Lakalaivan ja oikoradan km 50+700, hienoainesten huokospinta-alat vastasivat tukikerrosnäytteiden alhaisimpien huokospinta-alojen tasoa (alle $5\ \text{m}^2/\text{g}$). Havainto saattaisi viitata joidenkin tukikerrosnäytteiden hienoainesten huokospinta-alan selvään lisääntymiseen rakenteessa ollessaan, mutta tämä päätelmä vaatisi vahvistusta laajemmasta uusien murskeiden tutkimusaineistosta.



Kuva 4.33. Näytteiden hienoaainesten kokonaishuokostilavuus elohopeaporosimetrillä määritettynä.



Kuva 4.34. Näytteiden hienoainesten huokostilavuudet eri huokoskokoluokkiin jaoteltuna. V_{grav} = huokostilavuus $>10 \mu m$ huokosissa, V_{kap} = huokostilavuus $1...10 \mu m$ huokosissa, V_{ads} = huokostilavuus $0.006...1 \mu m$ huokosissa.

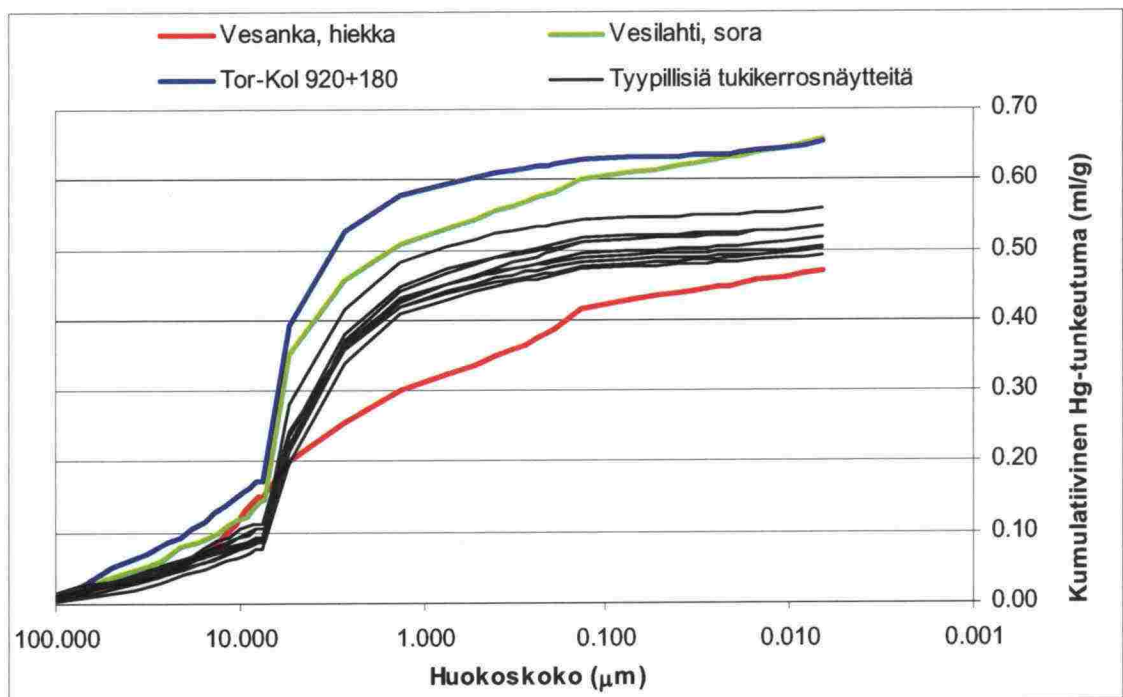


Kuva 4.35. Elohopeaporosimetrillä määritetyt hienoainesten huokosten seinämien kokonaispinta-alat.

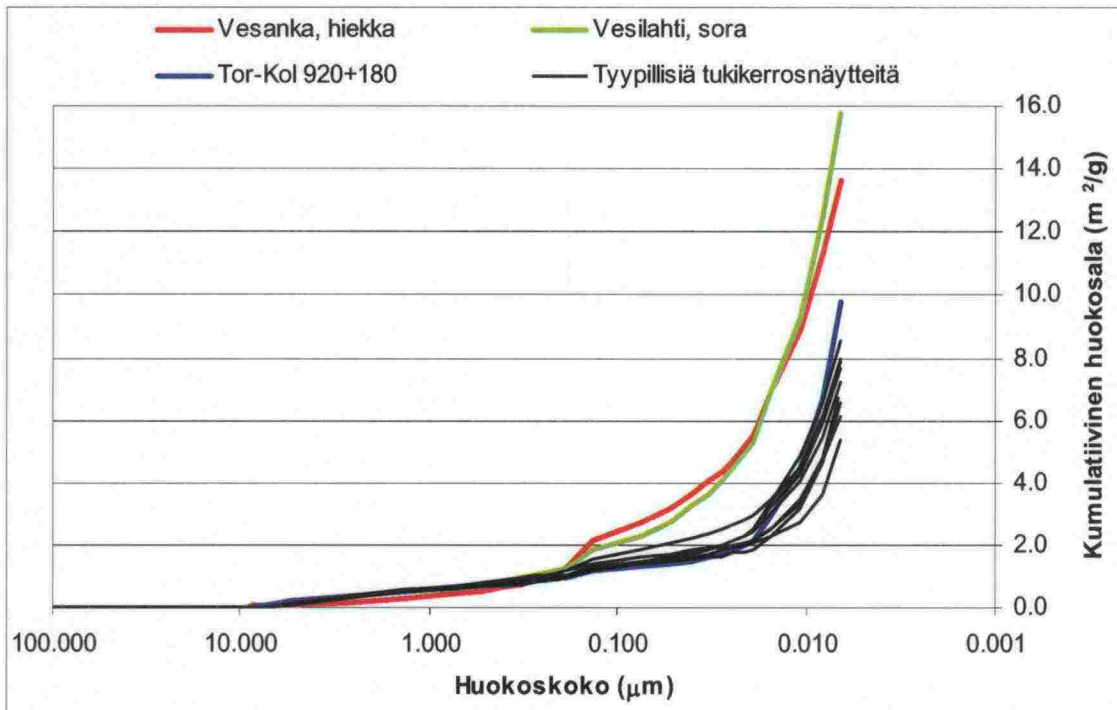
Erityisen huomattavaa huokospinta-alojen osalta on se, että tarkastelluista vertailu-materiaaleista sekä Vesilahden ($15.8 \text{ m}^2/\text{kg}$) että Vesangan ($13.6 \text{ m}^2/\text{kg}$) sorissa hieno-aineksen huokospinta-ala oli hyvin suuri. Tämä yhdessä kyseisten näytteiden suurten veden adsorptioiden ja ominaispinta-alojen kanssa puoltaa käsitystä siitä, että karkea-rakeisten luonnon lajittelemien materiaalien hienoaines on joissakin tapauksissa

vahingollisempaa kuin kalliomurskeista rakenteessa hienonemalla syntyvä hienoaaines. Yleisessä tapauksessa olosuhteet sorien ja hiekkojen sisältämän hienorakeisen aineksen kemialliselle muuttumiselle huokoisemmaksi ja siten ominaisuuksiltaan haitallisemmaksi ovat vuosituhansien kuluessa olleet ankarammat kuin rakenteessa mekaanisesti hienontuneilla kalliokiviaineilla, joiden murskauksesta on kulunut vasta joitakin vuosikymmeniä. Toisaalta karkearakeisten maalajien aines on jo niiden lajittuessa valikoitunut ainakin jossain määrin muuttumiselle altteimmasta aineksesta vapaaksi toisin kuin murskattu kalliokiviaines. Tästä suhteesta rakenteessa käytettävän murskatun kalliokiviaineen mineralogiavaatimukset ovat perusteltuja.

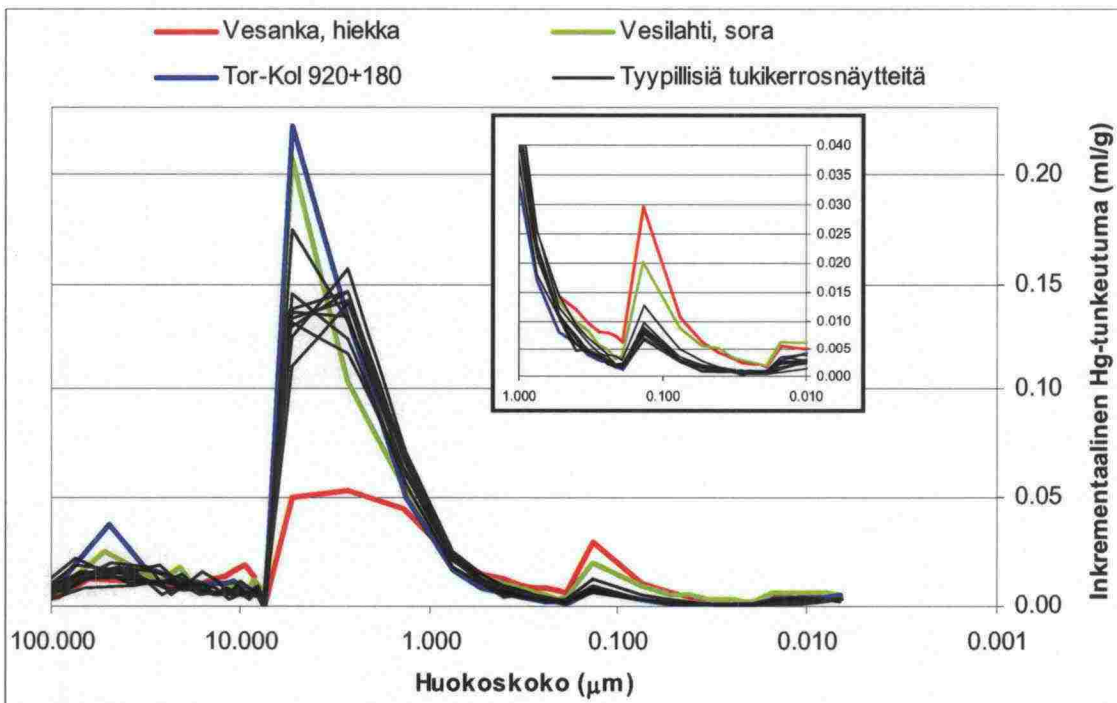
Kuvat 4.36–4.38 havainnollistavat tarkastelluista näytteistä poikkeavimpien huokoskokojakautumien eroja suhteessa tyypillisiin tukikerrosnäytteiden huokoskokojakautumiin. On kuitenkin syytä korostaa, että yleisessä tapauksessa tukikerrosnäytteiden huokoskokojakautumia kuvien 4.36–4.38 mukaisesti kuvaavat käyrät olivat varsin lähellä toisiaan. Poikkeavien näytteiden osalta kuvista 4.38 ja 4.36 havaitaan, että Vesilahden soran ja tukikerrosnäytteen Tor-Kol 920+180 tavanomaista suurempi kokonaishuokostilavuus olivat seurausta toisaalta 4...6 μm huokosten ja toisaalta 30...50 μm huokosten tavanomaista suuremmasta määrästä. Vastaavasti Vesilahden soran ja Vesangan hiekan erittäin suuri kokonaishuokospinta-ala johtui kooltaan alle 0.2 μm adsorptiohuokosten runsaasta määrästä (kuvat 4.37 ja 4.38). Kuvan 4.38 suurennoksesta on mielenkiintoista havaita selvä piikki kyseisten näytteiden huokostilavuudessa noin 0.1 μm huokoskoon kohdalla. Myös kuvissa esitettyjen poikkeavien näytteiden routimisherkyys todettiin niiden hienoaainesmäärään nähden poikkeuksellisen suureksi, mitä aihetta käsitellään tarkemmin luvussa 5 (esim. 5.4.1).



Kuva 4.36. Kumulatiivinen huokostilavuus huokoskoon suhteen tavanomaisilla tukikerrosnäytteillä sekä tarkastelluista hienoaineksista eniten poikkeavilla näytteillä.



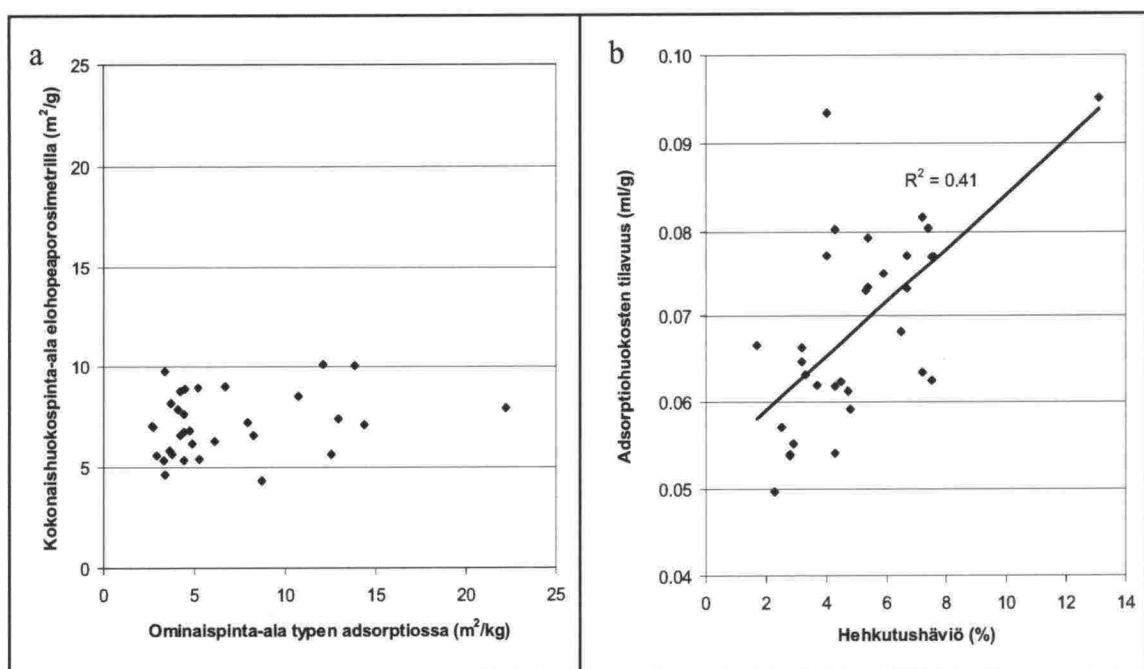
Kuva 4.37. Kumulatiivinen huokospinta-ala huokoskoon suhteen tavanomaisilla tukikerrosnäytteillä sekä tarkastelluista hienoaineksista eniten poikkeavilla näytteillä.



Kuva 4.38. Asteittaisen paineen lisäyksen seurauksena tapahtunut elohopean inkrementaalinen tunkeuma huokostilaan (kumulatiivisen huokostilavuuden kasvu kuvassa 4.36) tavanomaisilla tukikerrosnäytteillä sekä tarkastelluista hienoaineksista eniten poikkeavilla näytteillä.

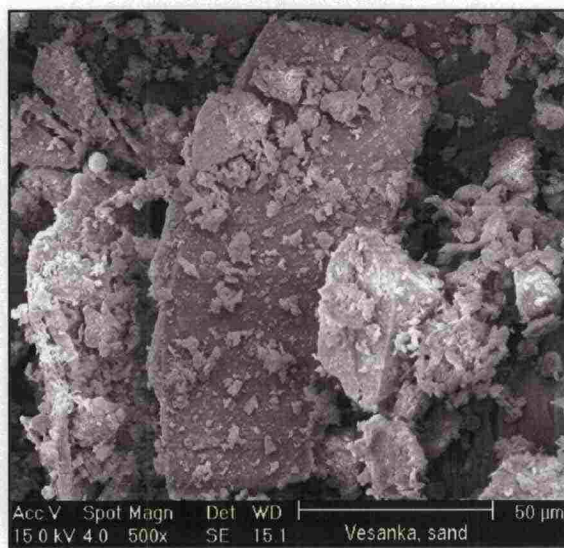
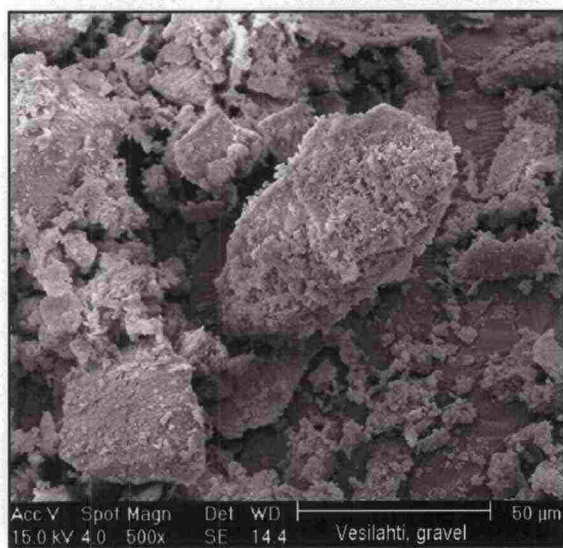
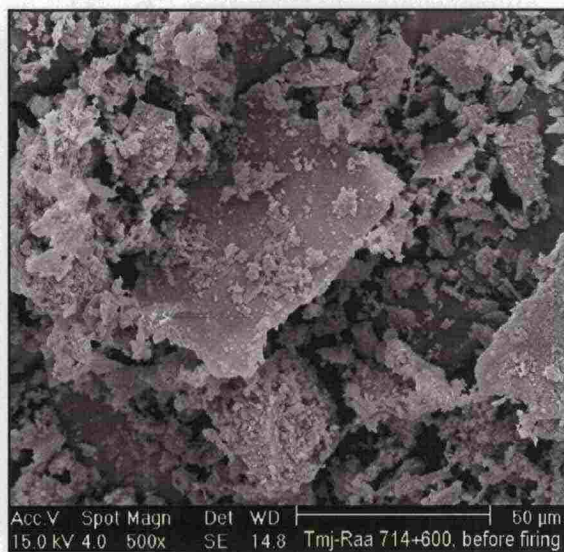
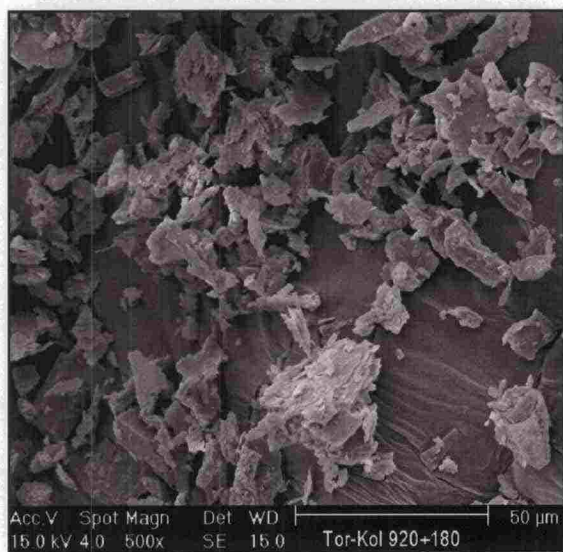
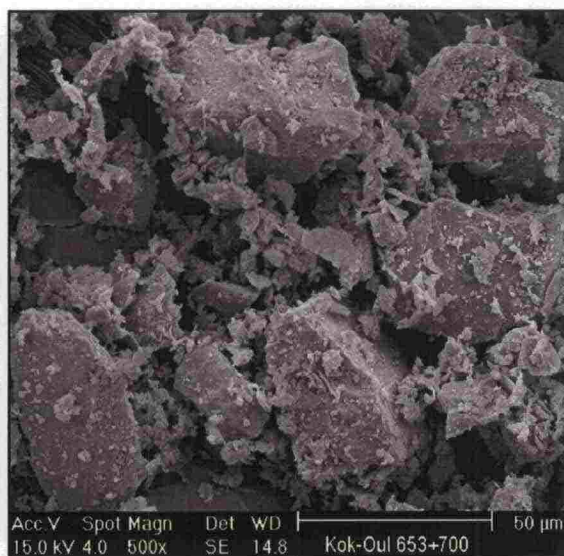
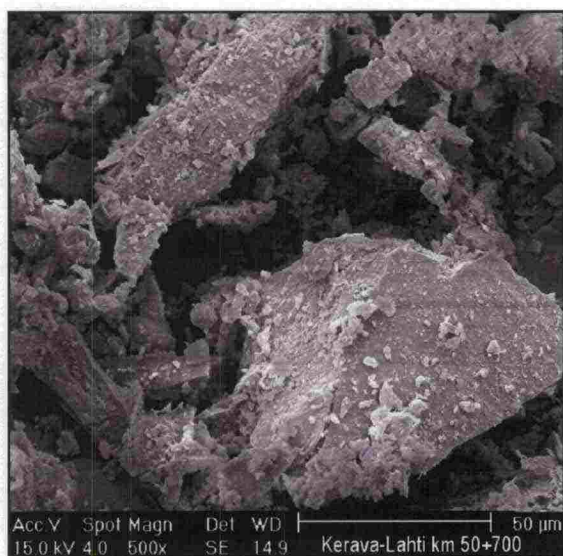
Hienoainesten kokonaishuokostilavuuden sekä gravitaatio- ja kapillaarihuokosten tilavuuden yhteys aiemmin esitettyihin hienoainesten hehikutushäviöihin, veden adsorptioihin ja ominaispinta-aloihin oli heikko. Lineaarisen riippuvuuden mukainen selitysaste (R^2) jäi kaikissa tapauksissa alle 0.1. Tilanne oli vastaava kokonaishuokos-

pinta-alojen samoin kuin kunkin eri huokoskokoluokan pinta-alojen suhteen. Testimenetelmien selkeistä eroista viestii esimerkiksi se, että typen adsorptiona määritetyn ominaispinta-alan ja elohopeaporosimetrillä määritetyn kokonaishuokosalan korrelaatio oli hyvin heikko (kuva 4.39a). Elohopeaporosimetrillä määritettyjen pinta-alojen vaihteluväli oli selvästi pienempi kuin typen adsorption mukaisilla ominaispinta-aloilla. Muista huokostilavuus- ja huokosalaparametreista poiketen adsorptiohuokosten tilavuus korreloi jossain määrin hehkutushäviöön ($R^2=0.41$) (kuva 4.39b), veden adsorptioon ($R^2=0.39$) ja ominaispinta-alaan ($R^2=0.25$). Huomattavaa on etenkin hehkutushäviön yhteys kaikkein pienimpien huokosten tilavuuteen. Tukikerrosnäytteiden hienoainesten sisältämä orgaaninen aines vaikuttaa siten edellisessä luvussa esitettyjen veden adsorption ja ominaispinta-alan (vrt. kuva 4.27) lisäksi selvästi myös adsorptiohuokosten tilavuuteen.



Kuva 4.39. Elohopeaporosimetrillä määritettyjen huokospinta-alojen huono yhteys typen adsorptiona määritettyihin ominaispinta-aloihin (vas.) ja adsorptiohuokosten tilavuuden selvä riippuvuus hehkutushäviöstä (oik.) tukikerrosnäytteiden hienoaineksissa.

Mitattujen ominaispinta-alojen sekä elohopeaporosimetrillä arvioitujen hienoainesten huokoisuuksien perusteella tehdyt arviot näytteiden rapautuneisuudesta saivat selvää vahvistusta pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvista (kuvat 4.28 ja 4.40). SEM-kuvista oli nähtävissä, että partikkelien pintarakenne oli pääosin varsin ehjää. Useimpien indeksikokeiden tulostensa osalta muista näytteistä selvästi poikenneen näytteen Tor-Kol 920+180 hienoaineksessa partikkelikoko oli yleisesti jonkin verran pienempi ja partikkelien muoto selvästi litteämpi muiden tukikerrosnäytteiden hienoaineksiin verrattuna. Myös näytteen Tor-Kol 920+180 pintarakenne oli kuitenkin varsin ehjää. Toisessa poikkeavassa näytteessä, Tmj-Raa 714+600, hienoaineksen poikkeavat indeksiominaisuudet olivat suurelta osin sen sisältämän orgaanisen aineksen säätelmiä, joskin joidenkin mineraalisten partikkeleiden rapautumista oli nähtävissä. Toisin kuin tukikerrosnäytteissä ja uusissa kalliomurskeissa, joissakin luonnollisissa maalajeissa, erityisesti Vesilahden sorassa ja Vesangan hiekassa hienoaineksen pintarakenne oli varsin huokoinen ilmentäen selkeää rapautuneisuutta.



Kuva 4.40. Hienoainesten SEM-kuvia 500-kertaisina suurennoksina. Yläriivi: esimerkkejä rapautumattomista tukikerrosnäytteistä. Keskiriivi: tukikerrosnäytteet, jotka olivat indeksikokeiden tulostensa osalta muista poikkeavia. Alarivi: rapautuneita sora- ja hiekanäytteitä.

5 ROUTANOUSUKOKEET

5.1 Tulosten yleistarkastelu

5.1.1 Tehdyt kokeet ja tulosten analysointi

Routanousukokeissa tarkasteltiin tukikerrosnäytteiden ja niistä haluttuihin rakeisuuksiin suhteistettujen näytteiden routimisherkkyyttä jäädytyskokeissa, joissa näyttemateriaalien oli mahdollista imeä lisävettä jäädytyksen aikana. Lisäksi kokeita tehtiin vertailtavuuden saavuttamiseksi joillekin luonnon lajittelemille karkearakeisille maa-lajeille sekä uusille kalliomurskeille. Koeteknisten rajoitteiden minimoimisessa keskeinen asia oli paloittelun näytemuottiputken käyttäminen. Routanousukoejärjestelyjä ja näytteiden valmistustekniikkaa on käsitelty tarkemmin edellä luvussa 3.3.

Tehtyjen routanousukokeiden koe- ja kiviainestiedot sekä tulospaarametrit on listattu liitteen 5 taulukossa. Kokeissa käytetyt kiviainesten rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 6. Näytteiden raekokojakautumat asetettiin pääosin vastaamaan raekokojakautumia, jotka saattavat olla hienonemisen myötä mahdollisia eristys- ja välikerroksissa. Tarkastelun pääpaino keskittyi siten kiviaineeksiin alle 10 % hienoainespitoisuuksilla.

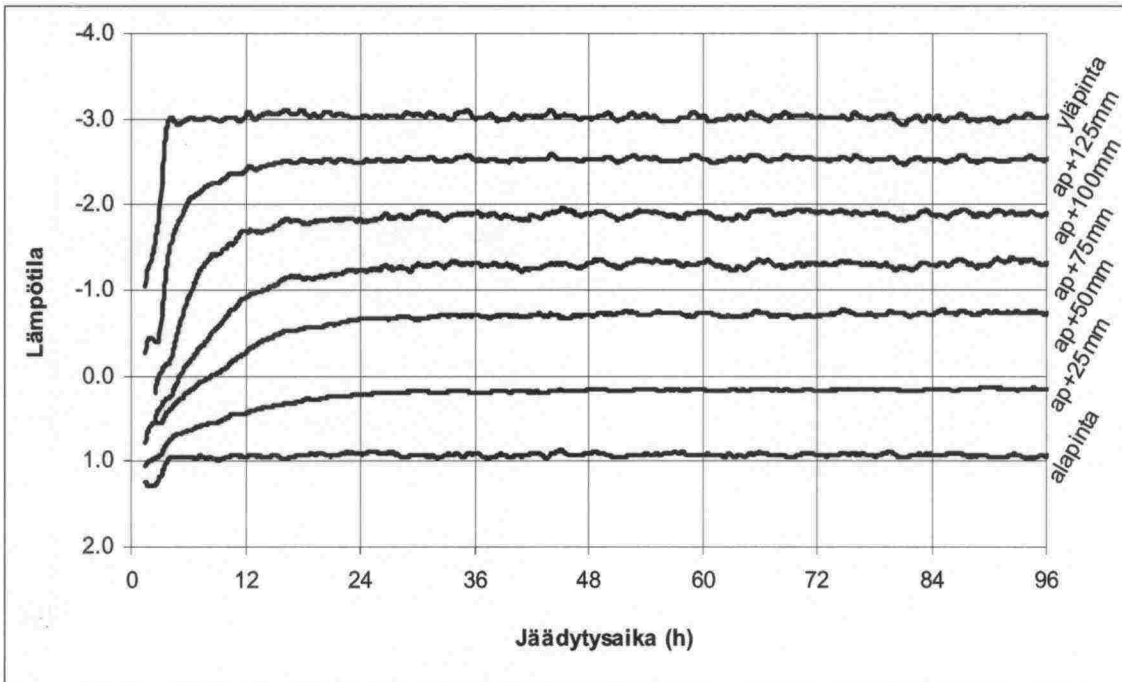
Seuraavassa tarkastellaan aluksi tulosten yleistä tulkintaa, tulospaarametreja ja niiden keskinäisiä korrelaatioita sekä arvioidaan routanousukokeen toistettavuutta. Kiviainesten routimisherkkyyden tarkastelu aloitetaan arvioimalla hienoaines*määrän* vaikutusta tutkittujen näytteiden routimisherkkyyteen (luku 5.2). Routanousukokeissa käytettyjen kiviainesten ja erityisesti niiden hienoainesten muita ominaisuuksia tarkasteltiin laajamittaisissa laboratoriokokeissa, joiden tuloksia käsiteltiin edellisessä luvussa 4. Jäljempänä (luku 5.4) tarkastelua jatketaan arvioimalla rakeisuudesta riippumattomien kiviainespattikkelien *laadullisten* ominaisuuksien vaikutusta routimisherkkyyteen.

Routimisherkkyyttä ilmentävien paarametrien ja hienoainespitoisuuksien välisiä korrelaatioita kuvaamaan valittiin Pearsonin korrelaatiokerroin. Samaa Pearsonin tulomomenttikerrointa käytettiin myös muissa esitettävissä korrelaatiotarkasteluissa.

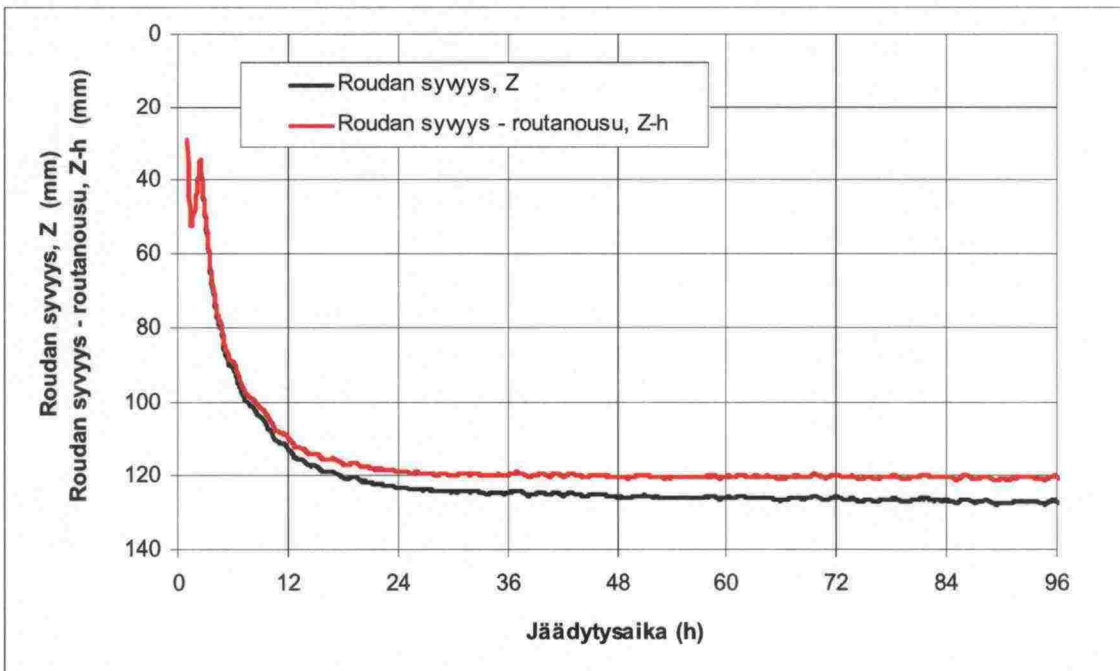
5.1.2 Tulosten tulkinta ja routimisherkkyyttä kuvaavat paarametrit

Näytteiden eri tasoilta jäädytyksen kuluessa mitatut lämpötilat voitiin esittää esimerkikikuvan 5.1 mukaisesti. Routanousukoe voidaan jakaa kahteen vaiheeseen jäätyksen etenemisen mukaan. Kokeen alussa näytteen alkaessa jäätyä routaraja työntyy alaspäin. Tätä vaihetta kutsutaan nimellä ”transient freezing”. Kun routaraja ei enää etene näytteessä, alkaa ”stationary freezing” vaihe. Konradin (1980) esittämän segregatiopotentialikonseptin mukaan näytteen routimisherkkyyttä kuvaava segregatiopotentiali tulisi määrittää hetkellä, jolloin transient freezing vaihe vaihtuu stationary freezing vaiheeksi, eli silloin kun routarajan eteneminen näytteessä pysähtyy. TPPT menetelmäohjeessa (Onninen, 2001) routanousukokeen varsinainen tulospaarametri, routimiskerroin, esitetään määrittäväksi vastaavassa jäätymisvaiheiden muutoskohdassa. Ongelmalliseksi asian tekee se, että vaiheiden muutoskohta on yleisessä tapauksessa huomattavasti epämääräisemmin määriteltävissä kuin kuvan 5.2 esimerkissä, jossa routarajan etenemistä kuvaavan Z-h-käyrän muuttuminen vaaka-

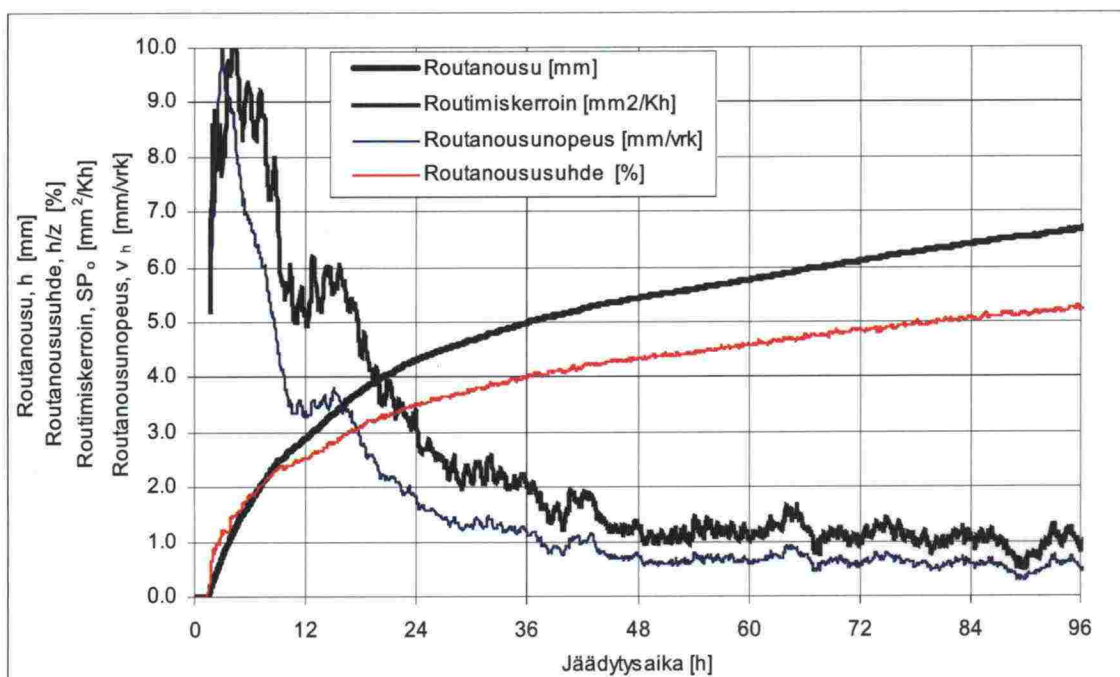
suoraksi tapahtuu varsin jyrkästi. Toisaalta routimiskerroin muuttuu hyvin voimakkaasti juuri transient ja stationary vaiheiden muutosvyöhykkeellä (ks. kuva 5.3). Routimis-kertoimen määrittämiseen sisältyy siis huomattavaa epävarmuutta, mikä tulee huomioida sitä käytettäessä. Lähinnä koejärjestelyjen eroavaisuuksista johtuen segregaatiopotentiaali (tai routimiskerroin) on kuitenkin yleisimmin hyväksytty tapa routivuuden määrälliseen arviointiin ja käytössä esimerkiksi tierakenteen routanousua tarkasteltaessa.



Kuva 5.1. Lämpötilat näytteen eri korkeustasoilla routanousukokeen jäädytysvaiheessa.



Kuva 5.2. Routarajan eteneminen (punainen käyrä) ja roudan kokonaissyvyys (musta käyrä) jäädytysajan suhteen.



Kuva 5.3. Routanousukokeen tyypillinen tulosesimerkki, jossa routimisherkkyyttä kuvaavat parametrit on esitetty ajan suhteen.

Ito et al. (1998) mukaan segregatiopotentiaalin vaihtelu vähenee oleellisesti, kun kokeessa vaikuttavaa lämpötilagradienttia pienennetään. Tämä on syytä huomioida, kun routanousukokeen menetelmää pyritään kehittämään. Toisaalta hyvin lähellä $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaa operoitaessa vaatimukset laitteiston lämpötilan säädön tarkkuudelle kasvavat. Lisäksi selvästi routivien materiaalien jäädyttäminen saattaa aiheuttaa vaikeuksia johtuen jäälinsin muodostuessa routarajalle virtaavan veden lämpökonvektiosta.

Routimisherkkyyden kuvaamiseen voidaan käyttää useita mittaustuloksista saatavia ja laskettavia parametreja. Kaikki parametrit ovat jäädytysajasta riippuvia, mistä syystä vertailuparametreiksi on valittava jotakin tiettyä ajan hetkeä vastaavat parametrit.

Routanousu (h) on selkeä, suoraan siirtymämittauksesta saatava parametri. Koe-tuloksista valittiin tunnusluvuiksi 1 ja 4 vuorokauden jäädytyksessä muodostuneet routanousut (h_{24h} ja h_{96h}).

Routanousunopeudella (v) tarkoitetaan aikayksikössä tapahtuvaa routanousua ja on siten koetuloksista helposti laskettavissa. Vertailuparametriksi valittiin routanousunopeus 24 tunnin jäädytyksen jälkeen (v_{24h}) sekä jäädytyksen toisen, kolmannen ja neljännen päivän keskimääräinen routanousunopeus (v_{24-96h}).

Routanoususuhde kuvaa routanousun (h) suhdetta jäätyneen kerroksen paksuuteen (Z). Vertailuparametreiksi valittiin routanoususuhde 1 ja 4 vuorokauden jälkeen $(h/Z)_{24h}$, $(h/Z)_{96h}$.

Segregaatiopotentiaalikäsitteeseen viittaava *routimiskerroin* (SP) lasketaan routanousunopeuden ja jäätyneen näytteenosan lämpötilagradientin suhteen yhtälön 5-1 mukaisesti. Routimiskertoimen vaihtelun tasaamiseksi routanousun lisäystä (Δh) tarkasteltiin 3 tunnin aikavälillä (Δt). Routanousukokeiden kuormittamattomuuden

korostamiseksi määritetyistä routimiskertoimista käytetään tunnusta SP_o . Routimiskertoimen ja routanoususuhteen laskennassa tarvittava jäätyneen näytteenosan paksuus (ts. roudan syvyys) Z lasketaan sulan näytteenosan korkeuden (Z_u), näytteen alku-korkeuden (H) ja routanousun (h) perusteella yhtälön 5-2 mukaisesti. Edellä kuvatusa routimiskertoimen määrittämisen epätarkkuudesta johtuen vertailuparametriksi valittiin myös keskimääräinen routimiskerroin jäädytysaikavälillä 12–24 tuntia ($SP_{o(12-24h)}$).

$$SP = \frac{v}{gradT_-} = \frac{\Delta h \cdot Z}{\Delta t \cdot (0 - T_{YLÄPINTA})}, \text{ missä} \quad (5-1)$$

$$Z = H + h - Z_u \quad (5-2)$$

SP	=	routimiskerroin, (mm^2/Kh)
v	=	routanousunopeus, (mm/h)
$gradT_-$	=	jäätyneen näytteenosan keskimääräinen lämpötilagradientti, (K/mm)
Δh	=	routanousun lisäys aikavälillä Δt , (mm)
Δt	=	aikaväli, (h)
Z	=	jäätyneen näytteenosan korkeus (ts. roudan syvyys), (mm)
$T_{YLÄPINTA}$	=	näytteen yläpinnan lämpötila ($^{\circ}C$)
H	=	näytteen alkukorkeus, (mm)
h	=	routanousu tarkasteluhetkellä, (mm)
Z_u	=	sulan näytteenosan korkeus, (mm)

Routimiskerroin eroaa periaatteessa segregatiopotentialista sikäli, että segregatiopotentialia määritettäessä yhtälössä 5-1 v ilmentää routanousunopeuden sijaan veden virtausnopeutta routimisvyöhykkeeseen (Konrad, 1980). Tällöin teoreettisesti tarkasteltuna segregatiopotentialiin ei sisälly veden jäätymisessä tapahtuvan 9 % tilavuudenkasvun vaikutusta toisin kuin routimiskertoimeen. Tästä syystä routimiskerointa voidaan periaatteiltaan pitää 1.09-kertaisena segregatiopotentialiin nähden, kun oletetaan, että kaikki jäätymisvyöhykkeeseen virtaava vesi päätyy kasvattamaan jäälinssiä. Täysin tai lähes täysin vedellä kyllästyneessä materiaalissa jäätyvän kerroksen alun perin sisältämän veden aiheuttama ns. in situ -routanousu tulee huomioiduksi routanousukertoimessa, mutta ei segregatiopotentialissa, mikä lisää em. eroa vedellä kyllästyneessä materiaalissa. Toisaalta periaatteellisenä erona käsitteiden välillä on myös se, että segregatiopotentialia määritettäessä tarkastellaan lämpötilagradienttia osittain jäätyneessä vyöhykkeessä routarajalla, eikä yhtälön 5-2 mukaisesti koko jäätyneessä kerroksessa.

Paloiteltua näytemuottia käytettäessä muottirenkaiden ja siten niihin kiinnitettyjen lämpötila-antureiden liikkua routanousun vaikutuksesta sulan näytteenosan korkeuden määrittäminen muuttuu epätarkaksi. Virhe kasvaa sitä suuremmaksi mitä suurempi on routanousu. Sulan näytteenosan korkeus lasketaan lämpötila-antureiden lukemien perusteella interpoloimalla nolla-asteen korkeusasema. Routanousun johdosta nolla-asteen sisältävän anturivälin ylemmän muottipalan ja siihen kiinnitetyn anturin noustessa antureiden välinen etäisyys kasvaa alkuperäisestä 25 mm:stä. Tätä ei ole laskelmissa edes yritetty huomioida, koska käytännössä on vaikea arvioida, kuinka suuri osa routanoususta realisoituu antureiden välisen etäisyyden lisäyksenä, ja toisaalta koska aiheutuva virhe on kohtuullisillakin routanousuilla vähäinen. Jos esimerkiksi noin

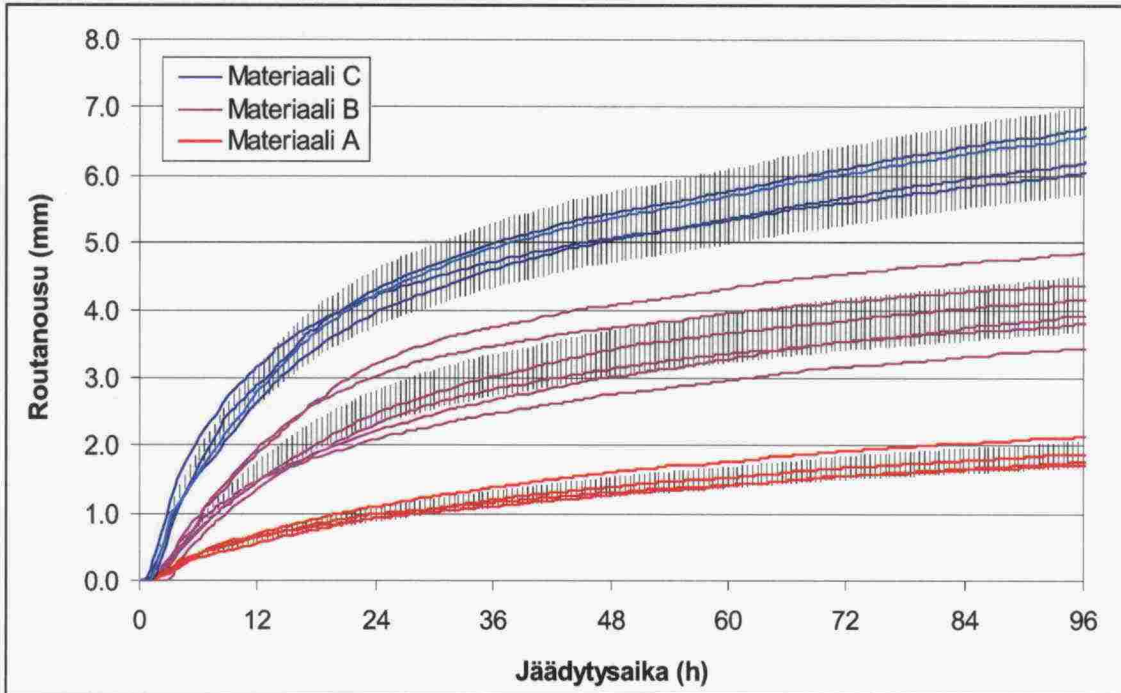
100 mm syvyyteen jäätyneessä näytteessä routanousu aiheuttaa interpoloitavalla anturivälillä antureiden 3 mm erkaantumisen, routan syvyys arvioidaan maksimissaan kyseisen 3 mm liian suureksi, jolloin jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti tulee lasketuksi 3 % todellista pienemmäksi. Siten routimiskerroin tulee vastaavasti lasketuksi 3 % todellista suuremmaksi. Esimerkin mukainen 3 mm irtaantuminen transient vaiheessa oli tutkituissa näytteissä suurimmasta päästä. Stationary-vaiheessa erkaantuminen etenkin pitkään kestävässä kokeessa ja routivassa näytteessä muodostui useassakin näytteessä esimerkkiä suuremmaksi, mutta tällä erkaantumisella ei ole merkitystä transient/stationary -vaiheen muutoshetkellä määritettävään routimiskertoimeen. Ottaen huomioon epävarmuus routarajan vakiintumisen määrittämisessä ja sen vaikutus routimiskertoimeen muottipalojen erkaantumisesta aiheutuva virhe routimiskertoimeen arvioitiin tarkastelluissa näytteissä merkityksettömäksi, mikä samalla puolsi paloiteltujen muottiputkien käyttöä.

5.1.3 Tulospaarametrien virherajojen arviointi

Automatisoidun lämpötilan säädön ansiosta jäädytyslaitteiston toiminta ei aiheuta suurempia toistettavuusongelmia. Mahdolliset häiriöt lämpötilaohjauksessa näkyisivät kuvan 5.1 mukaisessa tarkastelussa. Routakokeen toistettavuuden voidaan siten arvioida riippuvan suurelta osin näytteen valmistuksesta ja käytetyillä karkearakeisilla, mutta kuitenkin hienoinesta sisältävillä kalliomurskeilla erityisesti siitä, miten tasalaatuisena näytemateriaali kyetään näytemuottiin asettamaan.

Jäädytyksen alku- eli routarajan etenemisvaiheen (transient freezing) aikana muodostuvan routanousun osalta näytemateriaalin lievän epätasalaatuisen vaikutus lienee vähäinen. Myöhemmässä paikoillaan pysyvän routarajan vaiheessa (stationary freezing) juuri routarajalla sekä sen alapuolella olevan sulan näytemateriaalin ominaisuuksien merkitys syntyvälle routanousulle on keskeinen. Jo jäätyneellä näytteen osalla ei tällöin juurikaan ole vaikutusta routanousuun. Kyseeseen tuleva ei-toivottu tilanne saattaisi olla sellainen, jossa näytteen pohjalle ja erityisesti juuri stationääri-vaiheen routarajan tasolle tulee näytteenvalmistuksessa asetetuksi keskimääräisestä poikkeava määrä hienoinesta.

Kuvassa 5.4 on esitetty kolmelle eri vertailumateriaalille tehtyjen rinnakkaiskokeiden routanousukäyrät. Selvästi routivalle materiaali C:lle tehtyjen neljän kokeen käyrät ovat koko jäädytysajan hyvin lähellä toisiaan ja kulkevat kuvassa esitetyn keskimääräisen routanousukäyrän ± 10 % virherajojen puitteissa. Aivan jäädytyksen alkuvaihetta lukuun ottamatta käyrät mahtuisivat jopa ± 5 % virherajojen sisään. Myös miltei routimattoman materiaali A:n neljän rinnakkaiskokeen käyrät ovat varsin yhteneviä ja sijoittuvat pääosin kuvaan piirrettyjen keskimääräisen käyrän ± 10 % virherajojen sisään. Materiaali B:lle tehdyn kuuden kokeen routanousukäyrät poikkeavat selvästi enemmän toisistaan, eivätkä kaksi poikkeavinta käyrää mahdu kuvaan piirrettyjen keskimääräisen routanousukäyrän ± 10 % virherajojen sisään, vaan edellyttäisivät ± 20 % virherajoja.



Kuva 5.4. Kolmelle materiaalille tehtyjen rinnakkaisestien routanousukäyrät ja keskimääräisille käyrille piirretyt $\pm 10\%$ virherajat.

Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien virherajoja voidaan arvioida eri tavoilla. Rinnakkaisnäytteistä määritettyjen tulosparametrin keskihajonta (ks. taulukko 5.1) ilmaisee enimmäismäärän, jonka verran yksittäinen havainto 68 % todennäköisyydellä poikkeaa kyseisen parametrin odotusarvon estimaatista. Vastaavasti 1.64-kertainen keskihajonta ilmaisee vastaavan enimmäispoikkeaman 90 % todennäköisyydellä. Koska hajonnat kasvavat pääsääntöisesti parametrien keskiarvojen kasvaessa, keskihajontoja on mielekästä tarkastella keskiarvoihin suhteutettuna eli *variaatiokertoimina*. Materiaali C:lle tehdyssä rinnakkaiskokeissa tulosparametrien variaatiokertoimet olivat yleisesti ottaen hieman pienemmät kuin materiaalien A ja B koesarjoissa. Pienin variaatiokerroin kolmessa sarjassa keskimäärin (alhaalla taulukossa 5.1) oli neljän ja yhden vuorokauden jälkeisillä routanoususuilla (h_{96h} ja h_{24h}), joilla keskihajonta (kolmessa sarjassa keskimäärin) oli alle 10 % sarjan keskiarvosta (kuva 5.5). Huomattavaa on, että routimiskertoimen (SP_0) hajonta oli parametreista selvästi suurinta ja vastaava kolmen sarjan keskimääräinen variaatiokerroin oli sillä noin 20 %.

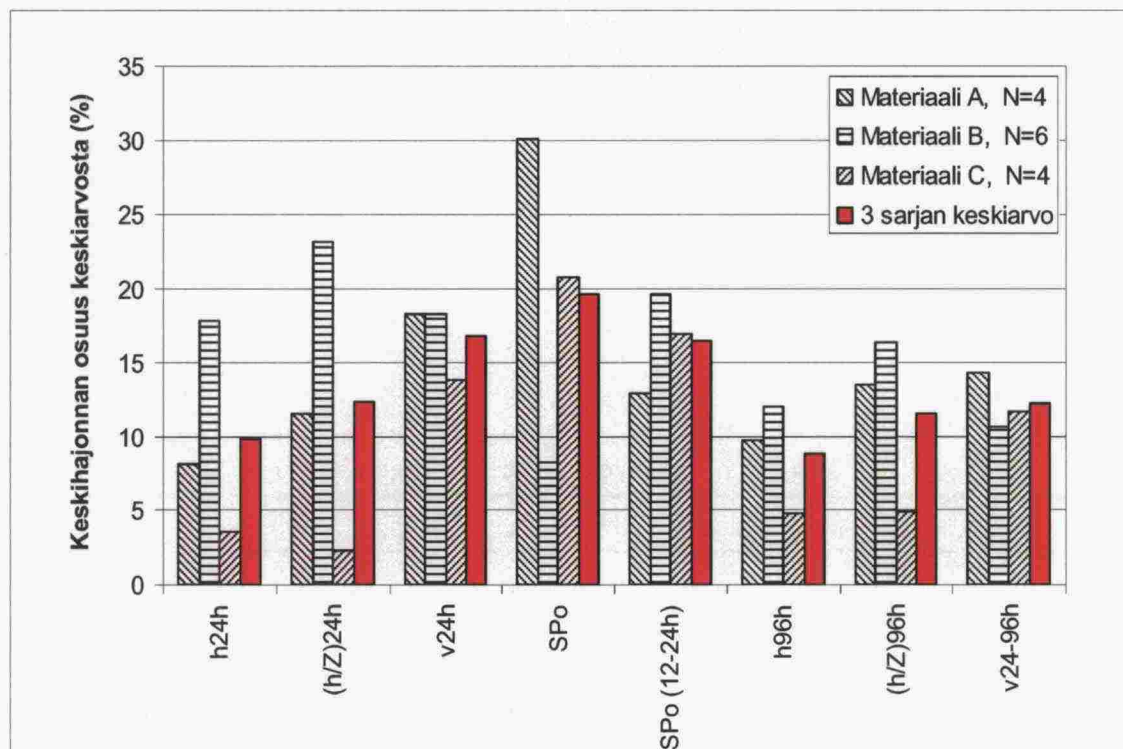
Kullekin tulosparametrille määritetty kolmen sarjan keskimääräinen variaatiokerroin (taulukko 5.1, kuva 5.5) estimoii parhaiten variaatiokertoimen odotusarvoa, eli kyseisen parametrin keskimääräistä keskihajontaa suhteessa keskiarvoon. Tällöin voitaisiin siis arvioida, että 90 % todennäköisyydellä yksittäisessä kokeessa saatu tulosparametrin arvo poikkeaa enintään 1.64 kertaa taulukossa esitetyn keskimääräisen variaatiokertoimen verran parametrin odotusarvosta. Todennäköisyysrajojen muodostamisessa laskennallisena rajoitteena on kuitenkin se, että hajonnat ja siten variaatiokertoimet vaihtelevat eri sarjoissa (taulukko 5.1, kuva 5.5). Tarkastelluista parametreista variaatiokerroin vaihteli sarjojen välillä vähiten parametreissa v_{24h} , v_{24-96h} , SP_{12-24h} ja h_{96h} ja vastaavasti eniten parametreissa SP_0 ja $(h/Z)_{24h}$. Eri sarjoista määritettyjen variaatiokertoimien keskihajonta (taulukko 5.1, s_v) tulisi huomioida luottamusvälejä muodostettaessa, mutta ongelmana on se, että jakaumaa ei tunneta. Esimerkiksi mikäli eri sarjoista määritetyt variaatiokertoimien arvot olisivat normaalijakautuneita,

yksittäisestä sarjasta määritetty variaatiokerroin olisi 90 % todennäköisyydellä enintään $1.28 \cdot s_v$ odotusarvoaan suurempi. Tulkinnan yksinkertaistamiseksi myöhemmissä routimisherkkyyteen vaikuttavien tekijöiden tarkasteluissa kiinnitetään huomiota yli 25 % mallinnetusta odotusarvosta poikkeaviin tuloksiin (esim. myöhemmin kuva 5.8).

Standardin SFS-EN 932-6 mukaiset toistettavuuden arvot (r) voidaan laskea kertomalla taulukossa 5.1 esitetyt keskihajonnat 2.8:lla.

Taulukko 5.1. Routanousukokeen tulospaametrieti hajontoja ja variaatiokertoimia kolmen eri materiaalin (A, B, C) rinnakkaisnäytteille tehdyissä koesarjoissa.

	h_{24h}	$(h/Z)_{24}$	V_{24h}	SP_o	SP_o	(12- 24h)	h_{96h}	$(h/Z)_{96}$	V_{24-96h}
Materiaali A, N=4	Keskiarvo	0.99	0.80	0.53	0.9	1.12	1.88	1.48	0.30
	Keskiarvon keskivirhe	0.04	0.05	0.05	0.2	0.07	0.09	0.10	0.02
	Otoskeskihajonta (s)	0.08	0.09	0.10	0.3	0.15	0.18	0.20	0.04
	1.64·s	0.13	0.15	0.16	0.4	0.24	0.30	0.33	0.07
	Variaatiokerroin (V)	8	12	18	30	13	10	13	14
	1.64·V (%)	13	19	30	49	21	16	22	23
Materiaali B, N=6	Keskiarvo	2.56	2.23	1.34	1.7	2.96	4.09	3.37	0.51
	Keskiarvon keskivirhe	0.19	0.21	0.10	0.1	0.24	0.20	0.23	0.02
	Otoskeskihajonta (s)	0.46	0.52	0.24	0.1	0.58	0.49	0.55	0.05
	1.64·s	0.75	0.85	0.40	0.2	0.96	0.81	0.91	0.09
	Variaatiokerroin (V)	18	23	18	8	20	12	16	11
	1.64·V (%)	29	38	30	13	32	20	27	18
Materiaali C, N=4	Keskiarvo	4.19	3.39	1.66	3.2	4.33	6.38	5.03	0.73
	Keskiarvon keskivirhe	0.07	0.04	0.11	0.4	0.37	0.15	0.12	0.04
	Otoskeskihajonta (s)	0.15	0.08	0.23	0.7	0.73	0.31	0.24	0.09
	1.64·s	0.24	0.13	0.38	1.1	1.21	0.51	0.40	0.14
	Variaatiokerroin (V)	4	2	14	21	17	5	5	12
	1.64·V (%)	6	4	23	34	28	8	8	19
V	Keskiarvo	10	12	17	20	17	9	12	12
	Otoskeskihajonta (s_v)	7	11	3	11	3	4	6	2
1.64·V	Keskiarvo	16	20	28	32	27	15	19	20
	Otoskeskihajonta ($s_{1.64V}$)	12	17	4	18	6	6	10	3



Kuva 5.5. Keskihajonnan osuus sarjan keskiarvosta (variaatiokerroin) routakokeen eri tulospaarametreilla. Punainen pylväs kuvaa kolmen sarjan variaatiokertoimien keskiarvoa.

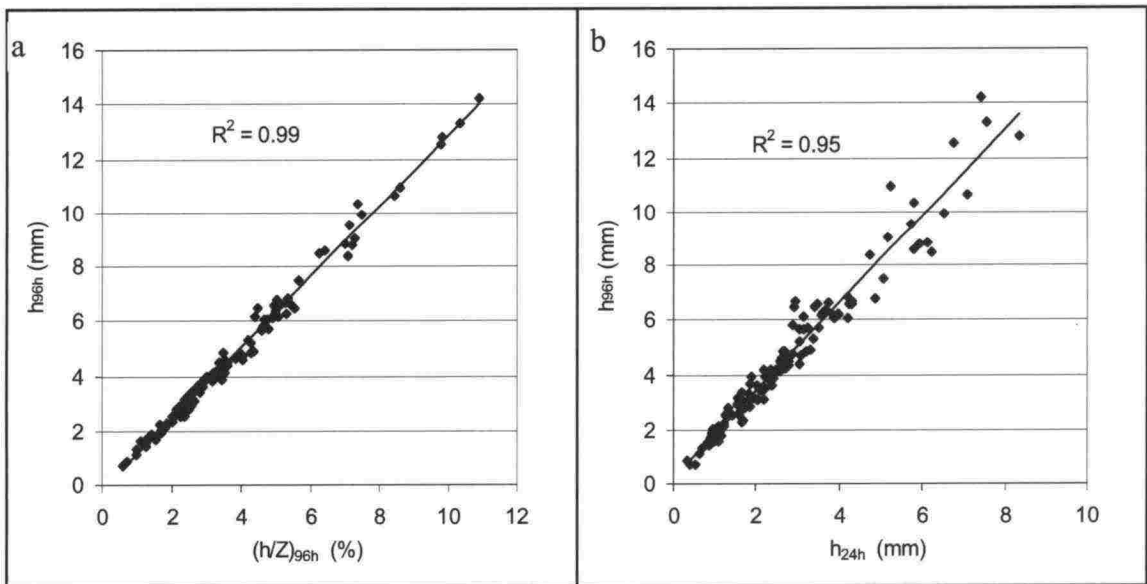
5.1.4 Routimisherkkyysspaarametrien keskinäiset korrelaatiot ja routivuusluokitus

Taulukossa 5.2 esitetyistä tuloksista havaitaan, että routimisherkkyyttä kuvaavilla paarametreilla paras keskinäinen korrelaatio oli neljän vuorokauden jälkeisellä routanousulla h_{96h} ja routanoususuhteella $(h/Z)_{96h}$ ($R=1.00$) (kuva 5.6a). Tähän osaltaan vaikutti se, että näytteet pyrittiin tekemään yhtä korkeiksi (150 mm), jolloin erot jäätyneen näytteenosan korkeuksissa (Z) olivat tarkasteltujen suhteellisten samantyyppisten näytemateriaalien välillä melko vähäisiä. Periaatteiltaan vastaava tilanne oli yhden vuorokauden jälkeisellä routanousulla h_{24h} ja routanoususuhteella $(h/Z)_{24h}$ ($R=0.99$). Myös yhden ja neljän vuorokauden jälkeisten routanousujen ja routanoususuhteiden (h_{24h} , $(h/Z)_{24h}$, h_{96h} ja $(h/Z)_{96h}$) välillä keskinäiset korrelaatiot olivat erittäin hyviä ($R=0.97-0.98$) (esim. kuva 5.6b). Kaikki taulukossa 5.2 esitetyt korrelaatiot olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($P < 0.001$).

Routimiskertoimen (SP_o) korrelaatio (kuva 5.7) oli suurimmillaan suhteessa neljän vuorokauden jälkeiseen routanousuun (h_{96h}) ($R=0.95$). Keskimääräinen 12 ja 24 tunnin jäädytyksen välillä vaikuttanut routimiskerroin ($SP_{o(12-24h)}$) korreloi varsinaista routimiskerrointa (SP_o) paremmin muihin paarametreihin keskimäärin. Parhaiten muihin routimisherkkyysspaarametreihin keskimäärin korreloivat neljän vuorokauden jälkeinen routanousu ja routanoususuhte (h_{96h} ja $(h/Z)_{96h}$) ja heikoiten routanousunopeudet (v_{24h} ja v_{24-96h}).

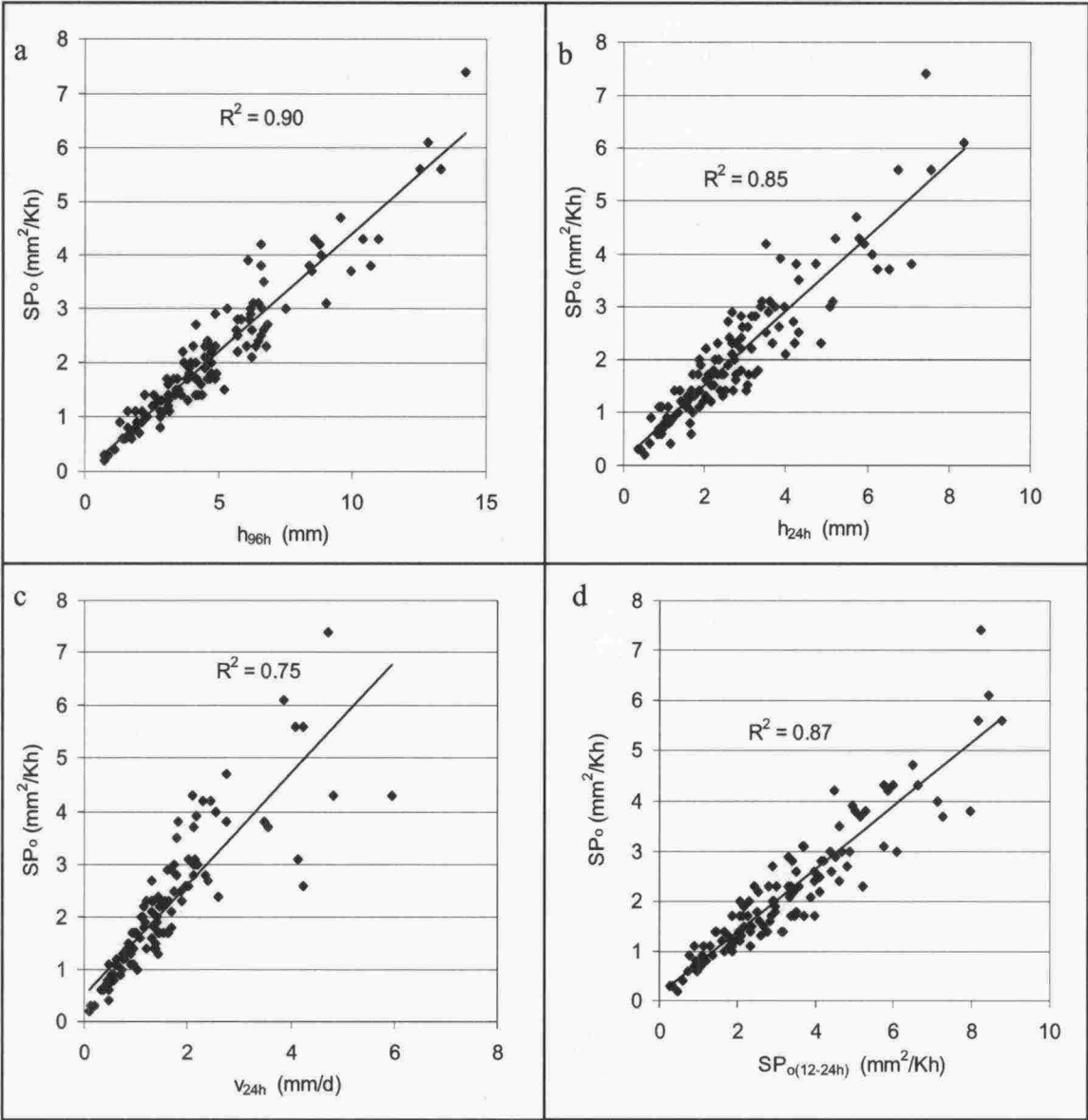
Taulukko 5.2. Routanousukokeen tulospaametriien keskinäiset korrelaatiokertoimet (R) alle 15 % hienoainespitoisuuksilla tehdyissä kokeissa tarkasteltuna.

	N	h_{24h}	$(h/Z)_{24h}$	V_{24h}	SP_o	SP_o (12-24h)	H_{96h}	$(h/Z)_{96h}$	V_{24-96h}
h_{24h}	122		0.99	0.87	0.92	0.97	0.98	0.97	0.86
$(h/Z)_{24h}$	122	0.99		0.89	0.91	0.97	0.98	0.98	0.87
V_{24h}	122	0.87	0.89		0.87	0.90	0.93	0.92	0.95
SP_o	118	0.92	0.91	0.87		0.93	0.95	0.94	0.91
SP_o (12-24h)	122	0.97	0.97	0.90	0.93		0.97	0.97	0.89
h_{96h}	118	0.98	0.98	0.93	0.95	0.97		1.00	0.95
$(h/Z)_{96h}$	118	0.97	0.98	0.92	0.94	0.97	1.00		0.94
V_{24-96h}	118	0.86	0.87	0.95	0.91	0.89	0.95	0.94	



Kuva 5.6. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien keskinäisiä korrelaatioita.

Laajasti hyväksytyn standardoidun routanousukokeen menetelmän puuttuessa eri laitteistoilla, jäädytysjärjestelyillä ja näytemittakaavoilla tehtyjen kokeiden tulosten vertailu routimisherkkyyden luokitteluksi ei yleensä ole mahdollista esimerkiksi routanousun tai routanousunopeuden perusteella. Routimisherkkyyden jaotteluun on ISSMFE:n (1989) toimesta esitetty segregatiopotentialiin perustuva taulukon 5.3 mukainen luokitus. Segregatiopotentialia laskettaessa huomioidaan tapahtuvan routanousun ohella myös nousuun vaikuttavia jäädytysolosuhteita (vrt. luku 5.1.2), jolloin segregatiopotentiali kuvastaa periaatteessa laitteistosta ja koeolosuhteista riippumatonta itse kiviaineksen routimisherkkyyttä. Routimiskertoimen ja segregatiopotentialin periaatteellisesta erosta (vrt. luku 5.1.2) johtuen segregatiopotentialiluokituksen raja-arvot on kerrottu taulukkoon 1.09:lla, kun luokitusta tarkastellaan routimiskertoimen perusteella. Näin saatu routimiskertoimeen perustuva luokitus on muunnettu taulukossa parametrien korrelaatioyhtälöiden perusteella myös muihin, laitteistosta ja koeolosuhteista riippuviin, routimisherkkyyssparametreihin nojautuvaksi.



Kuva 5.7. Routimiskertoimen korrelaatioita muihin routimisherkkyyssparametreihin.

Taulukko 5.3 Segregaatiopotentiaaliin perustuva routimisherkkyyden luokittelu (ISSMFE, 1989). Routimiskertoimen ja muiden parametrien korrelaatioyhtälöiden perusteella luokittelu on laajennettu muihin, osin koejärjestelyistä riippuviin, tulosparametreihin.

	Segregaatio- potentiaali	Routimis- kerroin, SP _o	h _{24h}	h _{96h}	SP _{o(12- 24h)}	V _{24h}
Routimaton	< 0.5	< 0.5	< 0.6	< 1.2	< 0.7	< 0.1
Lievästi routiva	0.5 – 1.5	0.5 – 1.6	0.6 – 2.2	1.2 – 3.7	0.7 – 2.4	0.1 – 1.1
Keskinkertaisesti routiva	1.5 – 3.0	1.6 – 3.3	2.2 – 4.5	3.7 – 7.4	2.4 – 5.0	1.1 – 2.6
Erittäin routiva	> 3.0	> 3.3	> 4.5	> 7.4	> 5.0	> 2.6

Kuvasta 5.7 nähdään, että vain aivan yksittäisissä kokeissa kiviaines voitiin tulkita taulukon 5.3 mukaisella luokituksella routimattomaksi. Näin siitäkin huolimatta, että suuri osa kokeista tehtiin hyvin pienillä hienoainespitoisuuksilla (vrt. liite 5)

käytännössä routimattomiksi oletetuille näytteille. Toisaalta on selvää, että myös hyvin alhaisilla kokonaisroutanousuilla (esimerkiksi kuvassa 5.4 materiaali A:n $h_{96h} \approx 2$ mm) routarajan etenemisen pysähtymisen jälkeen havaittavissa oleva routanousun lisääntyminen täytyy olla seuraus routimisilmiön tapahtumista. Näin ollen routimattomuuden merkitys käsitteenä on lähinnä teoreettinen. Sen sijaan tulisikin arvioida *käytännöllisen routimattomuuden* käsitettä. Pohjimmiltaan siitä on kyse myös useimmissa kirjallisuudessa esitetyissä routivuuskriteereissä, joita on tarkasteltu aiemmassa kirjallisuusselvityksessä (Nurmikolu, 2004).

Käytännöllisen routimattomuuden voidaan ajatella riippuvan käyttökohteessa kyseeseen tulevista rakenteellisista olosuhteista sallituista routanousuista ja niiden ylittymisen seurauksista. Siten käytännöllisen routimattomuuden rajojen arvioinnissa tulisi olla käytettävissä käyttökohteessa tehtyjä routimishavaintoja. Niiden puuttuessa taulukon 5.3 arvoja voidaan ajatella lievennettävän ratarakenteen rakennekerrosmateriaalien käytännöllisen routimattomuuden rajoiksi siten, että routimiskertoimen osalta raja-arvona olisi $1.0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, mikä vastaa käytetyillä koejärjestelyillä neljän vuorokauden routanousun arvoa 2.2 mm.

5.2 Hienoainesmäärän vaikutus routimisherkkyyteen

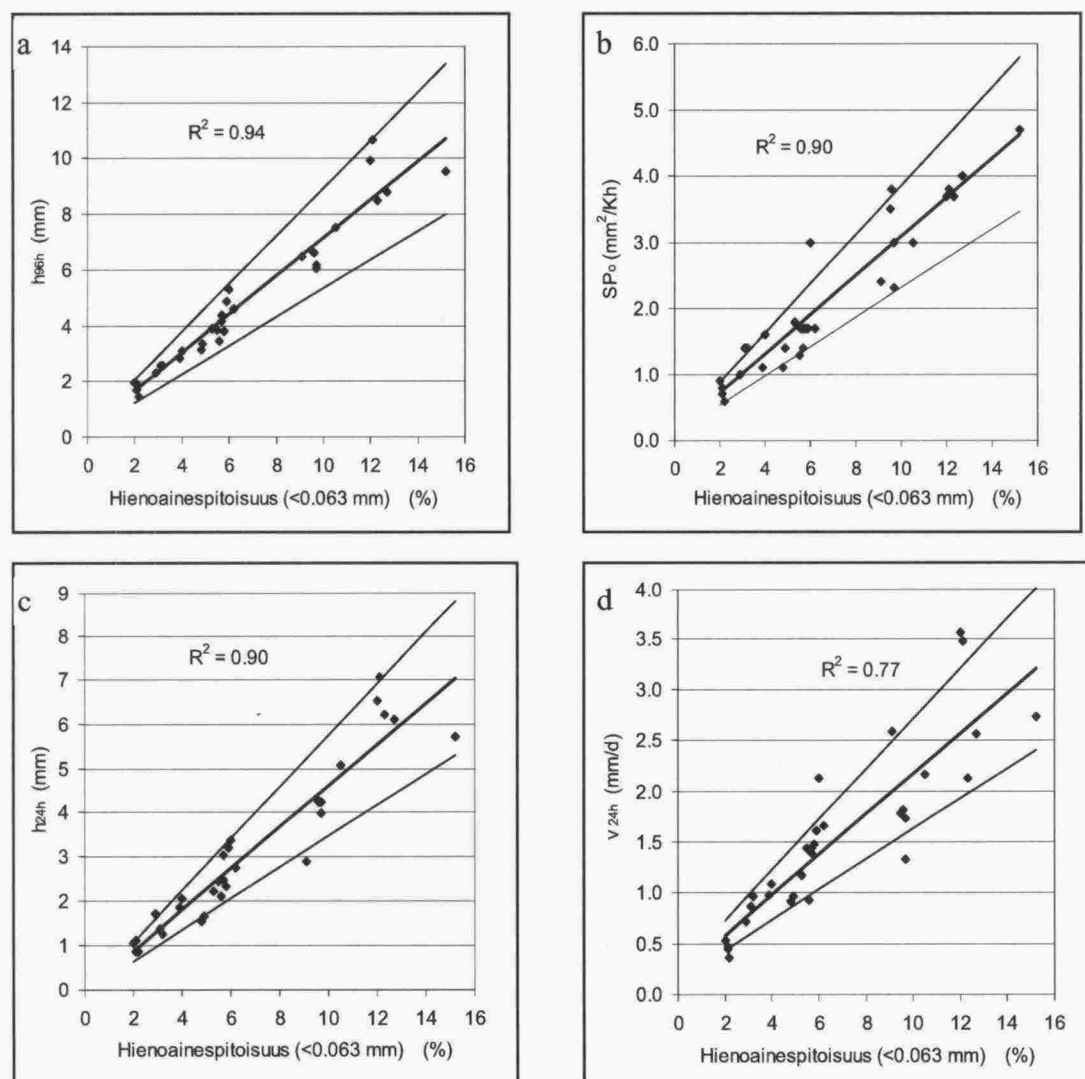
5.2.1 Kiviaineskohtainen tarkastelu

Tarkastelu hienoaineksen määrän vaikutuksesta routimisherkkyyteen on luontevaa aloittaa samalle kiviainekselle eri hienoainespitoisuuksilla tehtyjen kokeiden tuloksista. Kuvassa 5.8 on esitetty routimisherkkyyden erittäin voimakas riippuvuus kalliomurskeen km 50+700 sisältämän hienoaineksen (<0.063 mm) määrästä. Kaikkien tulosparametrien lineaarisen riippuvuuden mukaiset korrelaatiot hienoainesmäärään on esitetty kunkin tarkastellun kiviaineksen osalta erikseen taulukossa 5.4. Korrelaatio-tarkastelu rajattiin todellisissa kalliomurskeiden käyttökohteissa mahdollisia hienoainesmääriä ajatellen alle 15 % hienoainespitoisuuksilla tehtyihin kokeisiin. Näin tehtiin huolimatta siitä, että suuremmilla hienoainespitoisuuksilla tehdyt kokeet hieman paransivat korrelaatioita.

Taulukko 5.4. Lineaarisen riippuvuuden mukaiset korrelaatiot routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien ja kiviainesten sisältämän hienoainesmäärän ($\% < 0.063$ mm) välillä. Tarkastelussa mukana olivat alle 15 % hienoainespitoisuudella tehdyt kokeet.

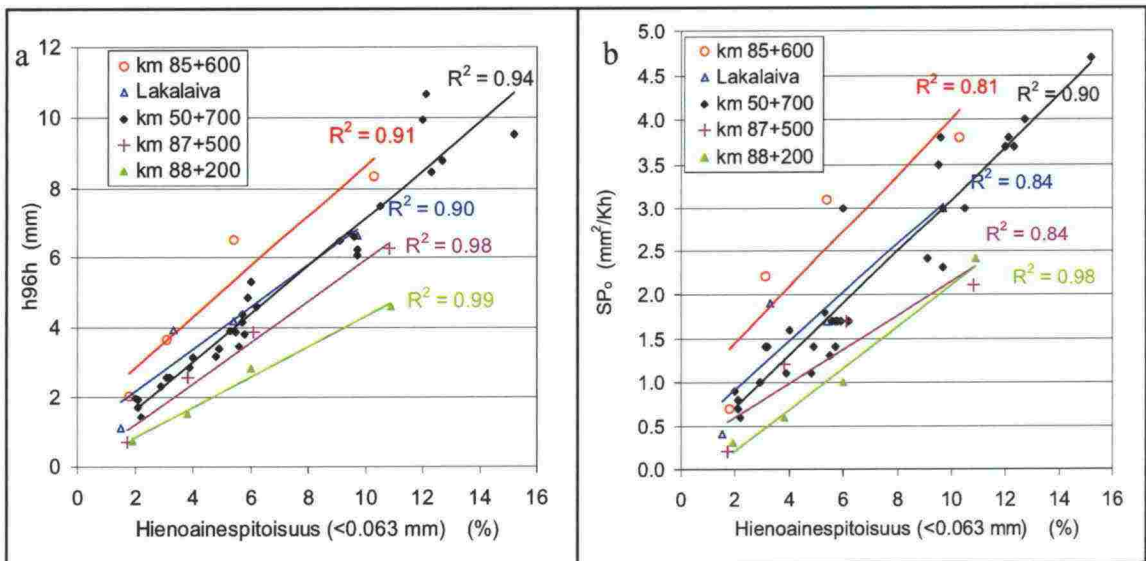
	km 50+700 N=31		Lakalaiva N=4		km 85+600 N=4		km 88+200 N=4		km 87+500 N=4	
	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P
h_{24h}	0.95	<0.001	0.98	0.021	0.97	0.032	1.00	0.001	1.00	0.002
$(h/Z)_{24h}$	0.94	<0.001	0.98	0.018	0.97	0.032	1.00	0.001	1.00	<0.001
v_{24h}	0.88	<0.001	0.97	0.027	0.94	0.057	0.96	0.036	0.98	0.024
SP_o	0.95	<0.001	0.91	0.086	0.90	0.102	0.99	0.009	0.92	0.081
$SP_o (12-24h)$	0.93	<0.001	0.98	0.025	0.96	0.040	1.00	0.004	0.98	0.019
h_{96h}	0.97	<0.001	0.95	0.052	0.96	0.044	0.99	0.005	0.99	0.008
$(h/Z)_{96h}$	0.96	<0.001	0.95	0.055	0.95	0.047	0.99	0.005	0.99	0.006
v_{24-96h}	0.91	<0.001	0.89	0.114	0.93	0.067	0.96	0.037	0.97	0.035

Hienoaineksen määrän lisäys kasvatti tarkastelluilla alle 15 % hienoainespitoisuuksilla kunkin kalliomurskeen routimisherkkyyttä hyvin lineaarisesti. Tämä havainto tukee Konradin ja Lemieuxin (2005) tuoreita tuloksia. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien korrelaatio hienoainespitoisuuteen oli erittäin voimakas. Päättökivimurskeessä (km 50+700) selitysaste (R^2) oli suurimmillaan neljän vuorokauden jälkeisen routanousun (h_{96h}) osalta peräti 94 %. Routimiskertoimen (SP_o) suhteen selitysasteeksi muodostui vastaavasti 90 %. Selvästi heikoin selitysaste päättökivimurskeessä oli routanousunopeuden (v_{24h}) suhteen ($R^2 = 77$ %). Kaikki kiviainekselle km 50+700 havaitut korrelaatiot olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($P < 0.001$). On huomattava, että h_{96h} :n kuvaajassa kaikki havaintopisteet sijoittuivat korrelaatio-suoran ympärille ± 25 % etäisyydelle piirrettyjen rajojen sisäpuolelle. Kyseisillä ± 25 % virhesuorilla on ilmennetty luvussa 5.1.3 esitetyn perusteella arvioituja yksittäisen mittaustuloksen virherajoja, eli korrelaation voidaan todeta olevan arvioidun koemenetelmän virherajan puitteissa täysin lineaarista. SP_o :n ja h_{24h} :n kuvaajissakin vain yksittäiset havainnot jäivät niukasti ± 25 % rajojen ulkopuolelle.



Kuva 5.8. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien (h_{96h} , SP_o , h_{24h} ja v_{24h}) riippuvuus raekooltaan alle 0.063 mm aineksen määrästä kalliomurskeessa km 50+700. Kuviin on piirretty yksittäisen mittauksen virherajojen hahmottelemiseksi ± 25 % suorat korrelaatio-suorien ympärille.

Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien korrelaatiot hienoainespitoisuuteen olivat voimakkaita kullakin kiviaineksella, mutta korrelaationsuoran taso vaihteli eri kiviaineksilla (kuva 5.9) ilmentäen kiviainesten ja niiden hienoaainesten laadullisia eroja. Koska hienoainekseen sisällä raekokojakautuma oli kussakin kokeessa toisiaan vastaava, kuvissa 5.8 ja 5.9 ja taulukossa 5.4 esitetyt selitysasteet ja korrelaatiokertoimet olivat vastaavat myös alle 0.02 mm tai alle 0.002 mm aineiden määriin. Tarkastelluista kiviaineksista päätutkimuskiviaineksen (km 50+700) routimisherkkyys suhteessa hienoainekseen määrään oli keskimääräistä tasoa. Hienoainesmäärään suhteutettuna routimisherkinä oli km 85+600 kiviaines. Vastaavasti km 88+200 kiviaines oli hienoainesmääräänsä nähden vähiten routimisherkkää. Erot kiviainesten välillä olivat kuitenkin suhteellisen pieniä. Seuraavassa luvussa tarkastellaankin kiviainesten routimisherkkyyden yhteyttä hienoainekseen määrään ottamalla eri kiviainekset yhteiseen tarkasteluun.



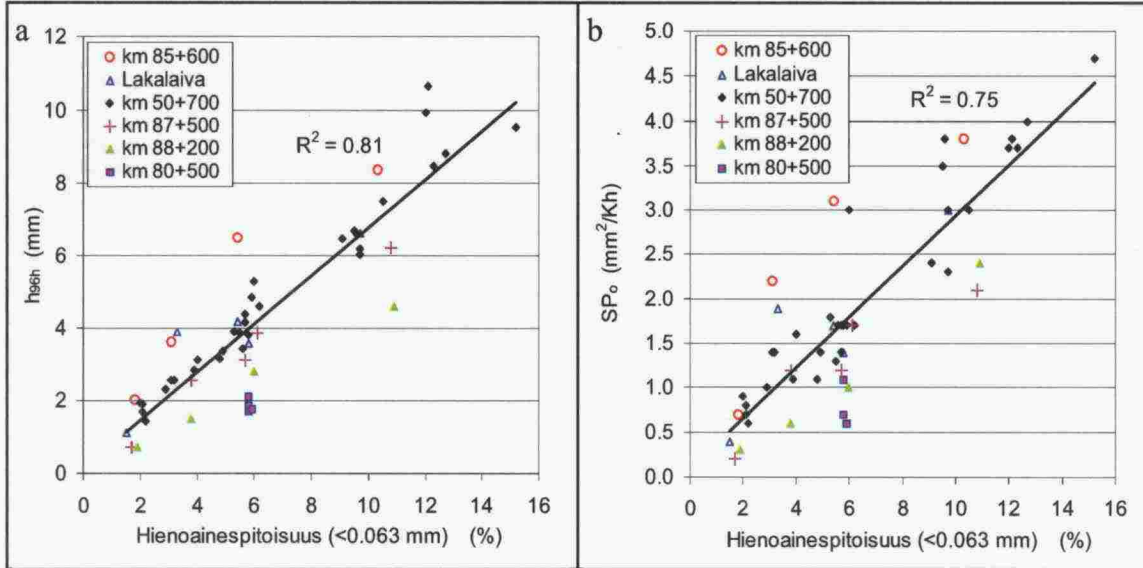
Kuva 5.9. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien (h_{96h} ja SP_o) ja hienoainespitoisuuden väliset korrelaationsuorat eri kiviaineksissa.

5.2.2 Uusien kalliomurskeiden yhteistarkastelu

Seuraavassa vaiheessa tarkasteltiin käyttämättömien kalliomurskeiden routimisherkkyyden riippuvuutta hienoainesmäärästä edellisessä luvussa esitetyn kiviainekohtaisen käsittelyn sijaan yhteisessä korrelaatiotarkastelussa. Tällöin routimisherkkyyden korrelaatio kiviainekseen sisältämään hienoainekseen määrään oli heikompi kuin kiviainekohtaisissa tarkasteluissa, mutta kuitenkin edelleen voimakas, kuten kuvan 5.10 esimerkeistä nähdään.

Kuvan 5.10 mukaisessa tarkastelussa on kuitenkin huomattava, että kiviainekselle km 50+700 tehtyjen kokeiden suuri määrä tutkimusaineistossa vääristää korrelaatiota, kun halutaan arvioida korrelaatiota hienoainesmäärään uusissa kalliomurskeissa yleisesti. Tämän vääristymän poistamiseksi korrelaatiot on määritetty taulukkoon 5.5 ja kuvaan 5.11 siten, että kiviainekselle km 50+700 tehdyistä kokeista tarkasteluaineistoon otettiin vain sama määrä havaintoja kuin muidenkin kiviainesten osalta. Kiviaineksen km 50+700 havainnot valittiin rinnakkaiskokeiden keskiarvotuloksista. Tarkastelussa oli siten yhteensä kuusi eri kiviainesta, kukin neljällä hienoainespitoisuudella, eli $N=24$.

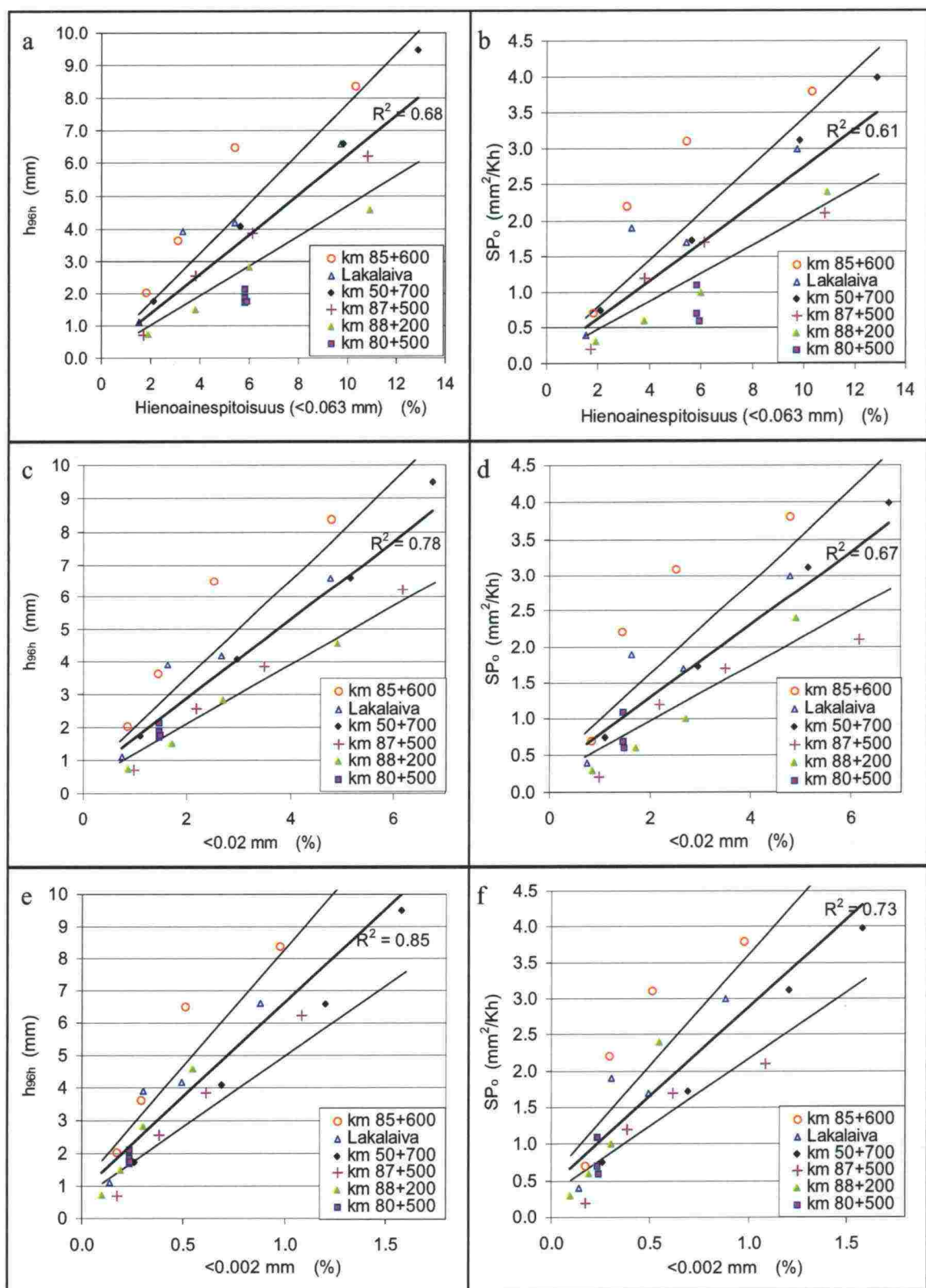
Koska hienoainesten sisäiset raekokojakautumat vaihtelivat eri kiviaineksissa, korrelaatiota tarkasteltiin hienoainespitoisuuden (<0.063 mm) ohella myös vielä hienompien lajitteiden pitoisuuksiin. Routimisherkkyyden korrelaatio havaittiin paremmaksi alle 0.02 mm aineksen ja alle 0.002 mm aineksen pitoisuuksiin kuin hienoainespitoisuuteen (<0.063 mm). Kaikki esitetyt korrelaatiot olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($P < 0.001$).



Kuva 5.10. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien (h_{96h} ja SP_o) riippuvuus materiaalin sisältämän raekooltaan alle 0.063 mm aineksen määrästä. Tarkastelussa olivat mukana kaikki uusille kalliomurskeille alle 15 % hienoainespitoisuuksilla tehdyt kokeet.

Taulukko 5.5. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien korrelaatiot eri hienoainelajitteiden määriin uusissa kalliomurskeissa. Tarkastelussa oli mukana kuusi kiviainesta ja kullekin neljä tehtyä koetta, eli $N=24$. Kaikissa korrelaatioissa $P < 0.001$.

	% < 0.063 mm	% < 0.02 mm	% < 0.002 mm
	R	R	R
h_{24h}	0.85	0.92	0.97
$(h/Z)_{24h}$	0.83	0.90	0.95
V_{24h}	0.80	0.84	0.86
SP_o	0.78	0.82	0.85
$SP_o (12-24h)$	0.87	0.92	0.93
h_{96h}	0.83	0.88	0.92
$(h/Z)_{96h}$	0.80	0.86	0.90
V_{24-96h}	0.75	0.78	0.79
keskiarvo	0.81	0.86	0.90



Kuva 5.11. Käyttämättömien murskeiden routimisherkkyiden (h_{96h} ja SP_0) riippuvuudet kiviaineksen sisältämien hienoimpien lajitteiden (<0.063, <0.02 ja <0.002 mm) määriin. Tarkastelussa oli mukana kiviainekselle km 50+700 tehdyistä kokeista vain neljä, jolloin kullekin kiviainekselle tehtyjen kokeiden määrä oli sama, toisin kuin kuvassa 5.10. Kuviin on piirretty yksittäisen mittauksen virherajojen hahmottelemiseksi ± 25 % suorat korrelaatio-suorien ympärille.

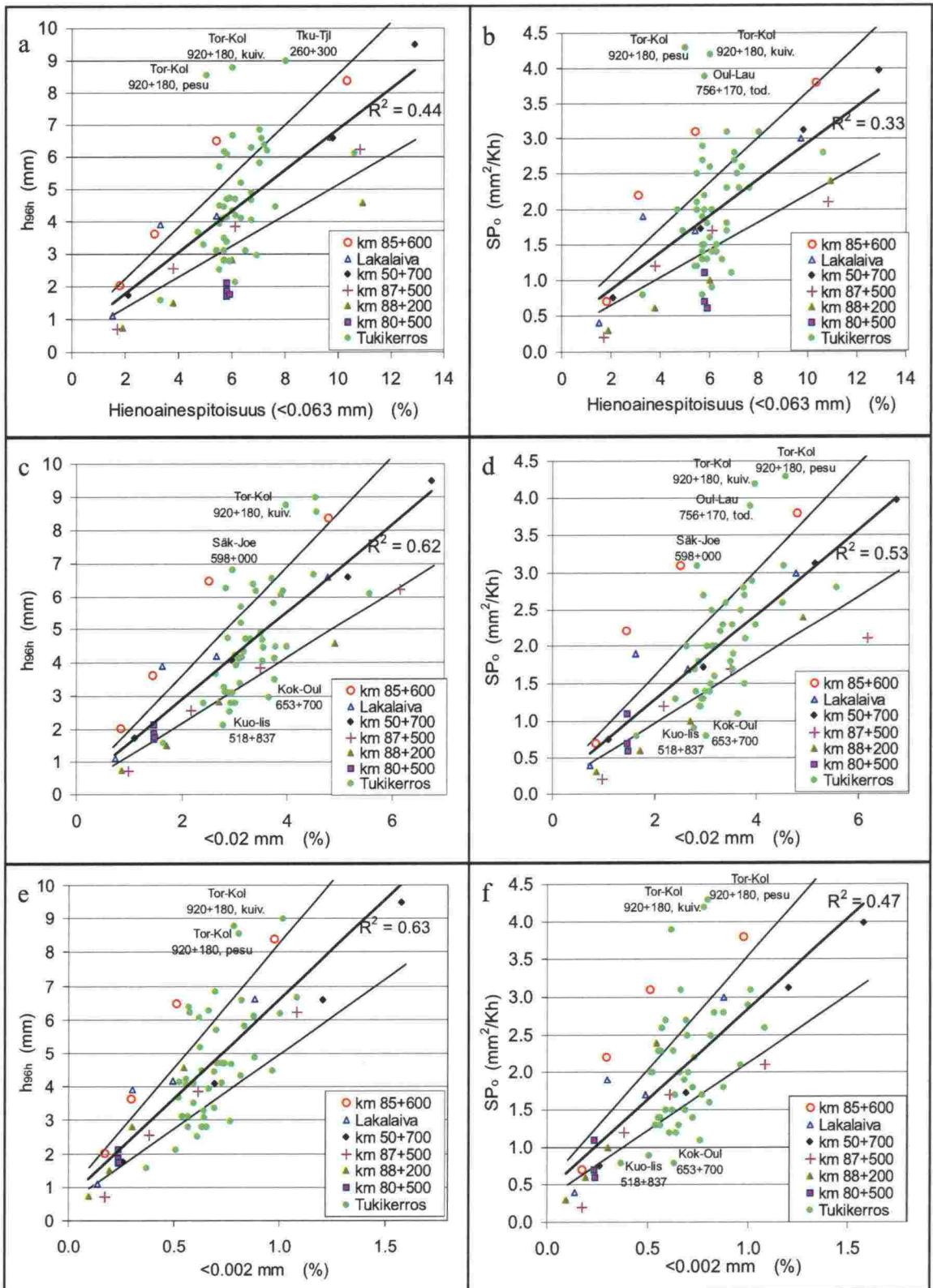
Kuvasta 5.11 ja taulukosta 5.5 nähdään, että kaikkein hienoimpien lajitteiden osuudet kiviaineksissa selittävät routimisherkkyyttä kuvaavia parametreja yleisesti ottaen erittäin hyvin. Korrelaatio paranee selvästi, kun routimisherkkyyttä tarkastellaan hienoainespitoisuuden sijasta alle 0.02 mm tai alle 0.002 mm aineksen määrän suhteen. Esimerkiksi kiviainesten km 80+500 ja km 88+200 routimisherkkyyys oli trendiä vähäisempi alle 0.063 mm aineksen määrän perusteella arvioituna (kuvat 5.11a ja b). Niiden hienoaineksissa oli kuitenkin muihin kiviaineksiin nähden vähemmän kaikkein hienointa ainesta, minkä johdosta niiden poikkeama trendistä on vähäinen alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm aineksen suhteen esitetyissä kuvissa 5.11c...f. Sitä vastoin kiviaineksen km 85+600 havaintopisteet sijoittuivat pääsääntöisesti hieman arvioitun yksittäisen kokeen virherajan yläpuolelle myös alle 0.002 mm suhteen piirrettyssä kuvassa, joten niiden osalta routimisherkkyyys ei täysin selity hienoimpienkaan lajitteiden määrän perusteella. Täten sen osalta routimisherkkyyteen on jossain määrin vaikuttamassa hienoaineksen laatuun tai karkeiden partikkeleiden ominaisuuksiin liittyvät tekijät, joilta osin tarkastelua jatketaan myöhemmin luvussa 5.4.

Tulosparametreista parhaiten hienoaineslajitteiden määrien kanssa korreloivat routanousu 24 tunnin jälkeen (h_{24h}) sekä 12 ja 24 tunnin väliltä määritetty keskimääräinen routimiskerroin ($SP_{o(12-24h)}$). Heikoin korrelaatio oli routanousunopeudella v_{24-96h} .

5.2.3 Uusien kalliomurskeiden ja tukikerrosnäytteiden yhteistarkastelu

Seuraavassa routimisherkkyyden ja kiviaineksen hienoainesmäärän korrelaatiotarkastelua jatketaan ottamalla edellisessä luvussa esitettyjen uusien kalliomurskeiden rinnalle tarkasteluun mukaan myös vuosikymmeniä raidesepeleinä toimineista hienontuneista kiviaineksista valmistetut näytteet. Erityisen huomion kohteena on tukikerrosnäytteiden routimisherkkyyys suhteessa uusien kalliomurskeiden routimisherkkyyteen vastaavilla hienoainespitoisuuksilla.

Kun edellä kuvissa 5.11 ja taulukossa 5.5 esitetyn korrelaatiotarkastelun aineistoon liitettiin haluttuun rakeisuuteen (liite 6) suhteistetuille tukikerrosnäytteille tehdyt kokeet, routimisherkkyyden yhteys hienoaineksen (<0.063 mm) määrään osoittautui taulukon 5.6 ja kuvan 5.12 mukaiseksi. Routimisherkkyyden korrelaatio hienoaineslajitteiden määriin oli selvästi heikompi kuin aiemmin kiviainekohtaisesti (kuva 5.9, taulukko 5.4) tai kaikille uusille murskeille (kuva 5.11, taulukko 5.5) tehdyissä tarkasteluissa. Kuitenkin korrelaatio oli etenkin partikkelikooltaan alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm ainesten osuuden suhteen edelleen voimakas vaihdellen eri tulosparametreissa välillä 0.69...0.81. Paras korrelaatio oli keskimääräiseen routimiskerroinparametriin $SP_{o(12-24h)}$, routanousuihin h_{24h} ja h_{96h} sekä routanousuja mukaileviin routanoususuhteisiin $(h/Z)_{24h}$ ja $(h/Z)_{96h}$. Vastaavasti heikoin korrelaatio oli routanousunopeuksiin (v_{24h} ja v_{24-96h}) sekä varsinaiseen routimiskertoimeen (SP_o).



Kuva 5.12. Neljän vuorokauden jälkeisten routanousujen (h_{96h}) sekä routimiskertoimien (SP_o) korrelaatiot eri hienoaineslajitteiden määriin. Tarkastelussa olivat mukana kuvan 5.11 aineiston lisäksi radassa hienontuneille tukikerrosnäytteille tehdyt kokeet. Kuviin on piirretty yksittäisen mittauksen virherajojen hahmottelemiseksi ± 25 % suorat korrelaatiosuorien ympärille sekä nimetty trendistä eniten poikkeavat materiaalit.

Taulukko 5.6. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien korrelaatiot <0.063 mm, <0.02 mm ja <0.002 mm aineksen määriin kaikissa tarkastelluissa kalliomurskeissa. Tarkastelussa olivat mukana taulukon 5.5 aineiston lisäksi 44 raidesepelikiviaineiksille tehtyä koetta, eli N =68. Kaikissa korrelaatioissa P <0.001.

	% < 0.063 mm	% < 0.02 mm	% < 0.002 mm
	R	R	R
h_{24h}	0.65	0.79	0.79
$(h/Z)_{24h}$	0.66	0.78	0.80
V_{24h}	0.58	0.70	0.73
SP_o	0.58	0.73	0.69
$SP_o (12-24h)$	0.68	0.81	0.80
h_{96h}	0.66	0.79	0.79
$(h/Z)_{96h}$	0.66	0.77	0.78
V_{24-96h}	0.61	0.72	0.71
keskiarvo	0.63	0.76	0.76

Edellisessä luvussa kuvattua havaintoa vastaavasti routimisherkkyyden korrelaatio oli parempi alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm aineksen määriin kuin hienoainespitoisuuteen (<0.063 mm) myös tukikerrosnäytteet huomioiden. Savespitoisuuden (<0.002 mm) suhteen korrelaatiota saattaa heikentää karkeampien rakeiden pinnoille kiinnittyneen aineksen kokojakautuman poikkeaminen kuivaseulonnassa irronneiden partikkelien kokojakautumasta. Toisaalta savespitoisuuden määrittämisessä on tarkastelluilla hyvin pienillä pitoisuuksilla väistämättä epätarkkuutta. Näistä syistä johtuen alle 0.02 mm aineksen osuutta voidaan pitää routimisherkkyydestä tarkasteluun soveltuvimpana. Tätä päätelmää tukee myös kirjallisuudessa luonnollisten maalajien routimisherkkyydestä tehdyt havainnot (esim. Kujala, 1991 ja Vinson et al, 1987). Routimisherkkyyssparametrien h_{96h} ja SP_o alle 0.02 mm aineksen määrään sidotut regressioyhtälöt saivat yhtälöissä 5-3 ja 5-4 esitetyn muodon. Yhtälöiden nojalla noin 1.5 % pitoisuus alle 0.02 mm ainesta vastaa edellä ehdotettua ($SP_o \leq 1.0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ ja $h_{96h} \leq 2.2 \text{ mm}$, vrt. luku 5.1.4) radan rakennekerroksissa käytettävien kalliomurskeiden käytännöllisen routimattomuuden rajaa. Tukikerrosnäytteiden keskimääräinen hienoaineksen sisäinen partikkelikokojakautuma huomioiden tämä raja vastaa noin 2.7 % hienoainespitoisuutta (<0.063 mm).

$$h_{96h} = 1.32 \cdot (\% < 0.02 \text{ mm}) + 0.24 \quad (R^2=0.62) \quad (5-3)$$

$$SP_o = 0.57 \cdot (\% < 0.02 \text{ mm}) + 0.14 \quad (R^2=0.53) \quad (5-4)$$

Tukikerrosnäytteillä keskimäärin routimisherkkyyden yhteys hienoainespitoisuuteen oli hyvin suurelta osin vastaava kuin uusilla kalliomurskeilla. Tämän nojalla vuosikymmenien kuluessa tukikerroskiviaineisiin rakenteessa kerääntynyt hienoaines ei keskimääräisesti ollut laadultaan oleellisesti routimisherkempää kuin uusien kiviainesten murskauksessa mekaanisesti syntynyt hienoaines. Yksittäiset hienoainesmääräänsä nähden jonkin verran yleisestä routimisherkkyytstrendistä poikkeavat materiaalit on havainnoitavissa kuvan 5.12 mukaisesta tarkastelusta. Hienoainesmäärään nähden selvimmin yleistä tapausta routimisherkempää oli kiviaines Tor-Kol 920+180. On huomattava, että myös yksi käyttämättömistä kiviaineksista, km 85+600, oli hienoainesmääräänsä nähden hieman keskimääräistä kiviainesta routimisherkempää. Tämä puoltaa käsitystä siitä, että havaitut erot ovat seurausta kiviaineksen

murskauksessa muodostuvan hienoaineksen ominaisuuksista, eivät niinkään rakenteessa tapahtuvista muutoksista. Vastaavasti hienoimpien lajitteiden määriin nähden vähiten routimisherkkiä olivat kiviainekset Kok–Oul 653+700 sekä Kuo–Iis 518+837.

Korrelaationsuorasta poikkeavien materiaalien osalta käyttäytymistä selittäviä tekijöitä tarkastellaan myöhemmin materiaalin laadun vaikutuksia käsittelevässä luvussa 5.4. Kaiken kaikkiaan on kuitenkin huomattava, että tutkituilla kalliomurskeilla routimisherkkyyys korreloi lineaarisesti suhteellisen hyvin materiaalin sisältämien kaikkein hienoimpien lajitteiden määrien kanssa.

5.2.4 Kalliomurskeiden ja luonnollisten maalajien yhteistarkastelu

Routimisherkkyyden ja hienoaineksen määrän yhteys säilyi huomattavana, kun edellisessä luvussa käsiteltyyn kalliomurskeaineistoon liitettiin myös sorille ja hiekoille (13), toistokuormituskokeessa hienontuneille murskeille (4) sekä kvartsi- ja maasälpä-hienoaineksille (4) tehdyt 21 koetta. Alle 15 % hienoainespitoisuuksilla (alle 8 % <0.02 mm aineksen pitoisuuksilla ja alle 2 % savespitoisuuksilla) korrelaatiokertoimet muodostuivat taulukon 5.7 mukaisiksi. Verrattuna pelkille kalliomurskeille tehdyissä kokeissa havaittuihin korrelaatioihin (taulukko 5.6) merkittävin ero on alle 0.063 mm määrän suhteen tarkasteltujen korrelaatioiden selvä heikentyminen. Alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm lajitteiden määrien suhteen korrelaatiot säilyvät samalla tasolla. Tämä ilmentää hienoaineksen kaikkein hienoimpien partikkeleiden primääristä vaikutusta routimisherkkyyteen. Savespitoisuuden (<0.002 mm) suhteen korrelaatiokertoimet kohosivatkin routanousujen, routanoususuhteiden ja keskimääräisen routimiskertoimen ($SP_o(12-24h)$) osalta tasolle 0.78-0.79.

Taulukko 5.7. Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien korrelaatiot <0.063 mm, <0.02 mm ja <0.002 mm aineksen määriin kaikissa tarkastelluissa kalliomurskeissa ja vertailumateriaaleissa alle 15 % hienoainespitoisuuksilla. N =89. Kaikissa korrelaatioissa P <0.001.

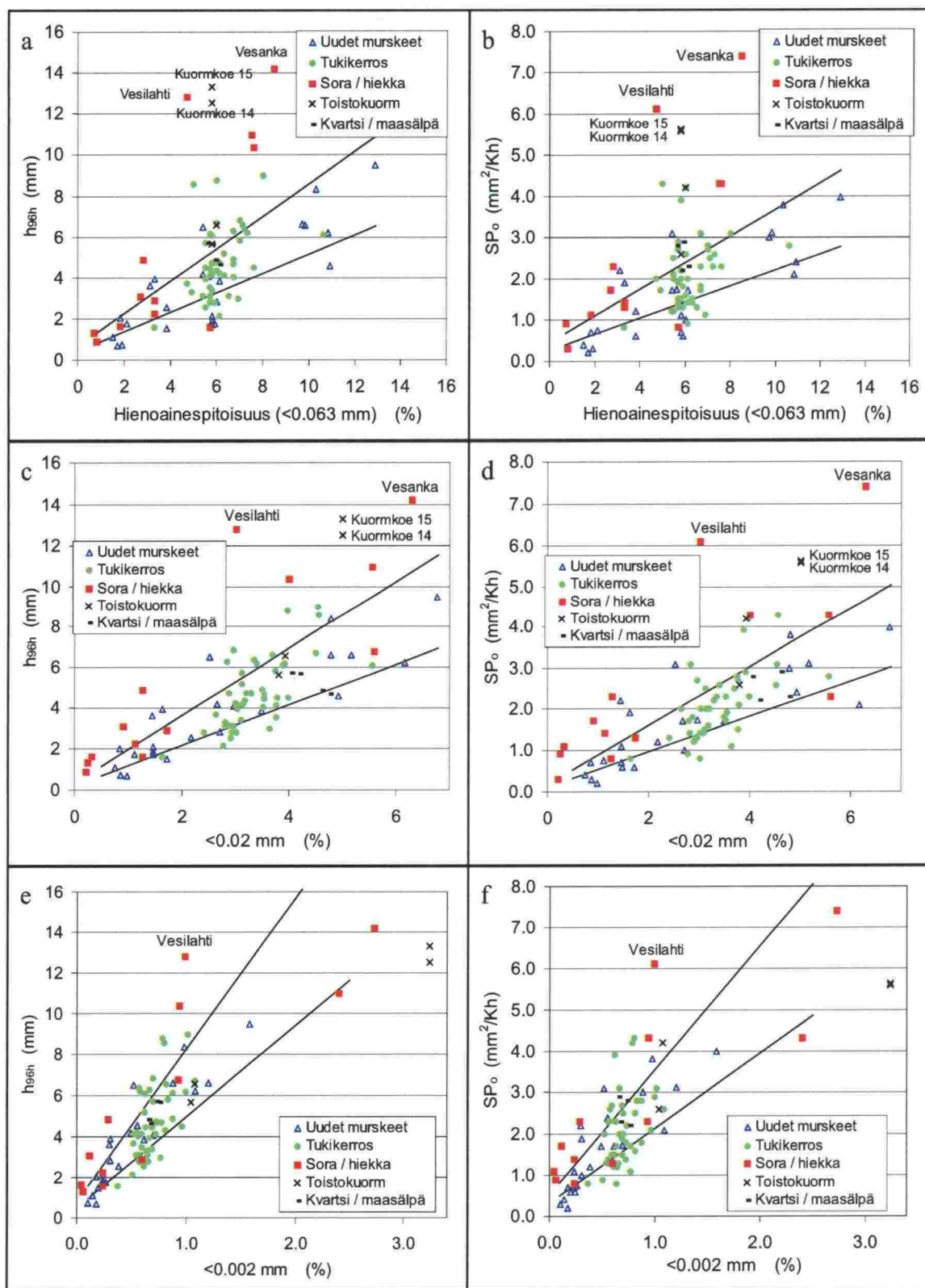
	% < 0.063 mm	% < 0.02 mm	% < 0.002 mm
	R	R	R
h_{24h}	0.54	0.75	0.78
$(h/Z)_{24h}$	0.56	0.76	0.79
V_{24h}	0.48	0.68	0.72
SP_o	0.46	0.69	0.69
$SP_o(12-24h)$	0.56	0.77	0.79
h_{96h}	0.53	0.75	0.78
$(h/Z)_{96h}$	0.54	0.75	0.79
V_{24-96h}	0.48	0.69	0.73
keskiarvo	0.52	0.73	0.76

Kaikki korrelaatiot olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($P < 0.001$). Muutamat yksittäiset suuremmilla hienoainespitoisuuksilla tehdyt kokeet olisivat parantaneet korrelaatiota lukuun ottamatta Kankaanpään hiekalle tehtyä koetta, jossa 23 % hienoainespitoisuudella neljän vuorokauden jälkeinen routanousu oli hyvin merkittävästi trendin mukaista pienempi, ainoastaan 6.8 mm (koe nro 101, liite 5). Kankaanpään hiekan käyttäytymistä selitti sen hienoaineksen raekokojakautuman voimakas painottuminen karkeimpiin partikkeleihin (0.02...0.063 mm), jotka eivät lisää routimisherkkyyttä yhtä ratkaisevasti kuin hienoaineksen hienoimmat partikkelit. Alle 0.02 mm

lajitteen määrän suhteen arvioituna Kankaanpään hiekan routimisherkkyyks on yleisen trendin mukaista. Vastaava havainto käänteisenä voitiin tehdä Vesangan hiekasta, jossa alle 0.063 mm aineksen määrän suhteen arvioituna routimisherkkyyks oli huomattavasti keskimääräistä suurempi (kuva 5.13). Vesangan hiekan hienoaineksessa oli kuitenkin selvästi tavanomaista enemmän kaikkein hienoimpia partikkeleita. Siten alle 0.002 mm aineksen määrän suhteen tarkasteltuna Vesangan hiekan routimisherkkyyks ei oleellisesti poikennut trendistä. Vesilahden soran osalta vastaavaa ei voida kuvista 5.13 havaita, sillä näytteen routimisherkkyyks on selvästi trendiä suurempi jokaisen hienoaineslajitteen suhteen tarkasteltuna.

Vesilahden ja Vesangan materiaalit olivat hienoainesmäärän perusteella arvioiden selvästi kalliomurskeita routimisherkempiä. Toisaalta esimerkiksi Kankaanpään hiekan kohdalla tilanne on päinvastainen. Huolimatta tarkasteltujen sora- ja hiekanäytteiden rajoitetusta määrästä kokonaisuutena tarkastellen luonnollisten karkearakeisten maalajien routimisherkkyydessä vaikuttaa olevan hienoainesmäärän perusteella arvioituna huomattavasti enemmän hajontaa kuin kalliomurskeissa. Vastaava havainto tehtiin hienoainesten muiden ominaisuuksien osalta jo aiemmin luvussa 4. Luonnollisten maalajien kulkeutumisen ja kerrostumisen aikana tapahtuneesta aineksen valikoitumisesta huolimatta kymmenien tuhansien vuosien altistumisaika ilmasto-erasituksille on rapauttanut joidenkin muodostumien heikoimpia kiviaineksia. Ympäristöerasitusten seurauksena kiviainesten huokoisuus ja vedensitomiskyky ovat lisääntyneet ja niiden seurauksena myös routimisherkkyyks on kasvanut. Ottaen huomioon sen tietämyksen, joka oli käytettävissä rataverkkomme alusrakennekerrosten rakennusajankohtana, routimisongelmista kärsivien rataosien kunnostustarvetta kartoitettaessa tulee rakennekerrosten routimisherkkyyden mahdollisuus ottaa huomioon. Kalliomurskeiden muutamien murskauksen jälkeisten vuosikymmenien aikana kohtaama ilmastorasitus ja siten sen seuraukset ovat heikoimpiin soriin ja hiekkoihin verrattuna vähäisiä. Tämä on positiivinen huomio ajatellen kalliomurskeiden käytön laajentumista alusrakennekerroksiin. Toisaalta on muistettava, että tarkasteltujen tukikerrosnäytteiden käyttöikä on enimmilläänkin ollut alle 50 vuotta ja alusrakenteelta edellytetään sadan vuoden käyttöikää.

Kuvassa 5.13 on esitetty tulokset myös kokeista, joissa uuden kalliomurskeeseen (km 50+700) hienoaines oli korvattu teollisesti erotelluilla (ks. luku 2.3.) kvartsi- ja maasälpähienoaineksilla. Kyseisten näytteiden routimisherkkyyks oli eri hienoaineslajitteiden määriin suhteutettuna trendin mukaista. Kuvassa on esitetty niin ikään joillekin toistokuormituskokeissa hienontuneille kiviaineksille tehtyjen routanousukokeiden havainnot. Toistokuormituskokeita ja niiden tuloksia käsitellään tarkemmin luvussa 6. Vedellä kyllästetyssä tilassa tehdyissä toistokuormituskokeissa (kokeet 14 ja 15, ks. luku 6.1.1) syntyneet hienoainekset voitiin todeta huomattavasti yleistä tapauستا routimisherkemmiksi (kuva 5.13a...d). Kyllästetyssä tilassa tehdyissä kokeissa veden mukana pumppautunut hienoaines oli hioutunut erittäin hienojakoiseksi. Niinpä tässäkin tapauksessa routimisherkkyyks on lähimpänä trendiä savespitoisuuden perusteella arvioituna. Kuivana tehdyissä toistokuormituskokeissa syntyneen hienoaineksen routimisherkkyyks oli likimäärin keskimääräistä uusien murskeiden hienoainesten routimisherkkyyttä vastaavaa.



Kuva 5.13. Routimisherkkyden (h_{96h} ja SP_0) riippuvuus eri hienoaineslajitteiden määristä. Edellisen kuvan 5.12 aineistoon on lisätty luonnollisten sora- ja hiekkamateriaalien, toistokuormituskoeksessa hienontuneiden kalliomurskeiden sekä kalliomurskeisiin sekoitettujen maasälpä- ja kvartsihienoaainesten tulokset. Yksittäisen mittauksen virherajoja hahmottelevat $\pm 25\%$ suorat on piirretty kalliomurskeille havaittujen korrelaatio-suorien ympärille ja ovat siten samat kuin kuvissa 5.12.

5.3 Muun rakeisuuden vaikutus routimisherkkyyteen

Hienoainesta karkeamman (>0.063 mm) hienorakeisen aineksen määrän havaittiin normaalisti ratarakennemateriaaleissa kyseeseen tulevalla vaihteluvälillä vaikuttavan tutkittujen kalliomurskeiden routimisherkkyyteen merkityksettömän vähän. Esimerkiksi lajitteen $0.063\text{--}0.125$ mm määrän kolminkertaistuminen ei hienoainesmäärän säilyessä samana vaikuttanut tutkittujen kiviainesten routimisherkkyyteen (kokeet 86, 87 ja 103 liitteessä 5).

Myös muun raekokojakautuman vaikutus routanousuun havaittiin tutkituilla kalliomurskeilla ratarakenteessa kyseeseen tulevalla ja koeteknisesti tutkittavissa olevalla raekokojakautuman vaihteluvälillä käytännössä merkityksettömäksi. Tuloksen yleistettävyyttä ajatellen on huomattava, että materiaalien maksimiraekooksi jouduttiin koemittakaavan vuoksi rajaamaan 31.5 mm. Konradin (1999, 2000) ja Casagranden (1932) havaintojen mukaan saman hienoainesmäärän sisältävistä materiaaleista tasarakeisen materiaalin routimisherkkyyks on vähäisempi kuin suhteistuneen materiaalin. Toisaalta etenkin suuren maksimiraekoon omaavalla ja sisäisen lajittumisen mahdollistavalla raekokojakautumalla hienorakeisin aines rikastuu materiaalin pohjalle, jolloin materiaalin routimisherkkyyks riippuu ratkaisevasti tarkasteltavasta korkeustasosta. Näin ollen routimisherkkyyden voidaan epäsuorasti ajatella olevan karkeamman aineksen raekokojakautumasta riippuvainen. Asialla on huomattavaa merkitystä sikäli, että sisäisen lajittumisen mahdollistavassa materiaalissa, kuten raidesepelissä, materiaalin pohjalla hienoainesmäärä ja siten routimisherkkyyks on ratkaisevasti suurempi verrattuna ylempiin, hienoaineksesta puhdistuneisiin kerroksiin.

5.4 Kiviainespartikkelien laadun vaikutus routimisherkkyyteen

5.4.1 Poikkeamat hienoainesmäärien perusteella ennustetuista routivuuksista

Edellisissä luvuissa joidenkin kiviainesten routimisherkkyyden todettiin poikkeavan hienoainesmääriin nojautuvista korrelaatio-suorista melko selvästi. Routimisherkkyyteen vaikuttavien partikkelien pintaominaisuuksien tarkastelemiseksi taulukkoon 5.8 on listattu ne routanousukokeet, joissa routimisherkkyyks poikkesi eniten pelkästään kalliomurskeiden eri hienoaineslajitteiden määriin sidotuista lineaarisista regressiomalleista. *Routimisherkkyyden poikkeavuutta on tarkasteltu neljän routimisherkkyyttä kuvaavan parametrin (SP_o , $SP_o(12-24h)$, h_{24h} ja h_{96h}) keskimääräisenä prosentuaalisena poikkeamana em. hienoaineslajitteiden määriin sidottujen regressiomallien mukaisista arvoista.* Taulukossa 5.8 on esitetty ne kokeet, joissa kiviaineksen routimisherkkyyks oli yli 45% suurempi tai yli 35% pienempi kuin johonkin hienoaineslajitteeseen (<0.063 mm, <0.02 mm tai <0.002 mm) nojautuva regressiomallin mukainen arvo. Suuret poikkeamat viestivät kiviainespartikkeleiden poikkeavista ominaisuuksista.

Taulukko 5.8. Routanousukokeet, joissa routimisherkyys todettiin vähintään 45 % suuremmaksi tai vähintään 35 % pienemmäksi verrattuna näytteen hienoainesmäärän (<0.063, <0.02 tai <0.002 mm) mukaiseen tutkittujen kalliomurskeiden keskimääräiseen routimisherkkyyteen. Tarkastelussa mukana ovat vähintään 0.2 % savespitoisuuden omaavat näytteet.

Koe	Runkokiviaines / hienoaines (jos ei oma)	0.063 mm v %	0.02 mm v %	0.002 mm v %	Routimisherkyiden poikkeamat trendistä (%)		
					< 0.063 mm:n suhteen	< 0.02 mm:n suhteen	< 0.002 mm:n suhteen
123	Vesilahti sora	4.7	3.0	1.0	+284	+218	+104
73	km 50+700 / Toistokuorm.koe 15	5.8	5.0	3.2	+210	+88	-35
72	km 50+700 / Toistokuorm.koe 14	5.8	5.0	3.2	+192	+77	-39
125	Tor-Kol 920+180, pesu	5.0	4.6	0.8	+150	+46	+69
102	Vesanka hiekka	8.5	6.3	2.7	+136	+61	-17
124	Tor-Kol 920+180	6.0	4.0	0.8	+115	+68	+75
114	Orv-Jmk 248, välikerrossora	2.8	1.3	0.3	+113	+165	+108
109	Vesanka hiekka / km 50+700	7.6	4.0	0.9	+86	+80	+60
110	km 50+700 / Vesanka, koe	7.5	5.6	2.4	+82	+25	-36
128	Oul-Lau 756+170	5.8	3.9	0.6	+72	+34	+67
71	km 50+700 / Toistokuorm.koe 4	6.0	3.9	1.1	+66	+32	+2
79	km 85+600	3.1	1.4	0.3	+62	+93	+67
78	km 85+600	5.4	2.5	0.5	+58	+77	+69
131	Lau-Rov 866+250	5.7	3.9	1.0	+55	+18	-3
10	Tku-Tjl 260+300	8.0	4.5	1.0	+48	+33	+24
46	Tku-Tjl 260+300	5.5	3.1	0.7	+47	+35	+22
83	Lakalaiva	3.3	1.6	0.3	+42	+59	+52
37	Säk-Joe 598+000	7.0	3.0	0.7	+37	+65	+43
57	Säk-Joe 598+000	6.7	2.8	0.7	+31	+58	+36
44	Tmj-Raa 703+170	7.3	3.4	0.6	+22	+34	+55
58	Tmj-Raa 703+170	7.2	3.3	0.6	+14	+25	+45
96	km 80+500	5.9	1.5	0.2	-64	-27	-24
93	km 80+500	5.8	1.5	0.2	-61	-20	-17
105	km 50+700 / Kankaanpää hiekka	5.7	1.3	0.2	-59	-5	-14
101	Kankaanpää hiekka	23.	5.6	0.9	-55	-10	+13
95	km 80+500	5.8	1.5	0.2	-53	-4	-2
103	Kuo-Iis 518+837	6.1	2.8	0.5	-53	-47	-43
94	km 80+500	5.8	1.5	0.2	-51	-1	+2
91	km 88+200	3.8	1.7	0.2	-51	-41	-18
34	Kok-Oul 653+700	5.7	3.0	0.6	-44	-45	-48
12	Kok-Oul 653+700	6.9	3.6	0.8	-44	-46	-47
90	km 88+200	6.0	2.7	0.3	-43	-35	+3
45	Kok-Oul 624+810	3.3	1.6	0.4	-37	-30	-42
48	Kok-Oul 653+700	5.5	2.9	0.6	-35	-36	-40

> +80 %
 +50%...+80%
 +35%...+50%
 -35%...+35%
 -50%...-35%
 < -50%

Taulukosta havaitaan, että routimisherkkyydeltään em. rajoja enemmän trendistä poikenneita kiviaineksia oli melko vähän. Hienoainesmäärään nähden selvästi routimisherkkintä oli Vesilahden sora (koe 123, liite 5). Sen yllä esitetyllä tavalla arvioitu routimisherkkyyys oli 284 % suurempi kuin tarkastelluille kalliomurskeille laaditun lineaarisen regressiomallin arvo vastaavalla alle 0.063 mm aineksen määrällä. Alle <0.02 mm aineksen määrän suhteen tarkasteltuna ero oli 218 % ja alle 0.002 mm aineksen määrän suhteen 104 %. Luonnollisista maalajeista myös Orv-Jmk km 248 välikerrossoran sekä Vesangan hiekan routimisherkkyyys oli hienoainesmääräänsä nähden poikkeavan suuri.

Hienoaineen sisäisen kokojakautuman poikkeavuuksista johtuen routimisherkkyyys poikkesi trendistä voimakkaasti joissakin kiviaineksissa alle 0.063 mm aineksen määrän suhteen, mutta selvästi vähemmän hienompien lajitteiden suhteen tarkasteltuna. Toistokuormituskokeiden 14 ja 15 hienoainesten, näytteiden km 80+500 ja km 88+200 sekä osittain Vesangan hiekan osalta kyseisiä huomioita käsiteltiin edellä luvuissa 5.2.2 ja 5.2.4. Havainnot olivat osaltaan vaikuttamassa siihen, että routimisherkkyyys korreloi hienoainesmäärää paremmin kaikkein hienoimpien lajitteiden määriin.

Kalliomurskeita, joissa hienoainesmäärään nähden poikkeavan suuret routimisherkkyydet eivät täysin selittyneet myöskään hienoainesten sisäisillä kokojakautumilla olivat Tor-Kol 920+180, km 85+600, Oul-Lau 756+170, Säk-Joe 598+000 ja Tmj-Raa 703+170. Näissä näytteissä routimisherkkyyys oli 45–93 % suurempi kuin alle 0.02 mm tai alle 0.002 mm aineksen määriin perustuvilla regressiomalleilla arvioitiin. Vastaavasti poikkeavan vähäisessä määrin routimisherkkiä kalliomurskenäytteitä olivat Kuo-Iis 518+837, Kok-Oul 653+700 ja Kok-Oul 624+810, joissa routimisherkkyyys oli runsaat 40 % vähäisempi kuin alle 0.02 mm tai alle 0.002 mm aineksen määriin perustuvilla regressiomalleilla arvioitiin. Hienoainesmääräänsä nähden poikkeavan suuren tai vastaavasti alhaisen routimisherkkyyden näytteiden hienoainesten pintarakennetta havainnollistettiin edellä esitetyissä (kuva 4.40) SEM-kuvissa. Kuvista voitiin todeta voimakkaan routimisherkkyyden näytteiden, Vesangan hiekan ja Vesilahden soran hienoainesten pintarakenteen olleen selvästi huokoista ja rapautunutta. Tukikerrosnäytteessä Tor-Kol 920+180 hienoainespartikkelit olivat selvästi litteämpiä ja jonkin verran hienorakeisempia muiden kalliomurskeiden hienoaineksiin verrattuna. Hienoainesmääräänsä nähden alhaisen routimisherkkyyden näytteessä Kok-Oul 653+700 hienoainespartikkelien pinta voitiin todeta varsin ehjäksi.

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan hienoainesten eri ominaisuuksien sekä karkeiden partikkeleiden vedenimun merkitystä routimisherkkyyttä selittävinä muuttujina. Tämän arvioimiseksi tehdyn askeltavan regressioanalyysin tuloksia esitellään luvussa 5.4.5. Kyseisessä analyysissä tarkasteltuihin kokeisiin voitiin kuitenkin valita koeaineistosta vain ne, joiden kiviaineksista oli määritetty kaikki selittäviksi muuttujiksi valitut ominaisuudet. Eri ominaisuuksille tehtyt koesarjat eivät kuitenkaan kaikilta osin olleet kaikkia kiviaineksia koskevia. Tästä syystä tarkasteluun otettavan aineiston maksimoimiseksi tarkastelun lähtökohdaksi otettiin aluksi (luvut 5.4.2–5.4.4) routimisherkkyyden ja hienoaineslajitteiden määrien välisten lineaaristen regressiomallien suhteelliset poikkeamat, residuaalit, joihin etsittiin yhteyttä kiviaineksista määritetyistä partikkelien pintaominaisuuksista. Näitä suhteellisia poikkeamia edustavat mm. taulukossa 5.8 esitetyt prosentuaaliset arvot. Tarkasteluun otettiin mukaan ne

kokeet, joiden kiviaineksista tarkasteltava ominaisuus oli tutkittu ja kiviaines täytti seuraavat kriteerit:

1. Karkeat rakeet ja hienoaines näytteessä olivat samaa kiviainesta (vrt. liite 5)
2. Savespitoisuus ($\% < 0.002 \text{ mm}$) kokeessa vähintään 0.2 % (vrt. liite 5)
3. Kiviainekselle km 50+700 tehdyistä 31 kokeista tarkasteluun otettujen määrä rajattiin neljään kokeeseen (vrt. luku 5.2.2)
4. Rataosan Tmj–Raa näytteille tehtyt kokeet jätettiin hyvin poikkeavien kiviaines-ominaisuuksien vuoksi (vrt. luvut 4.3 ja 4.4) tarkastelun ulkopuolelle

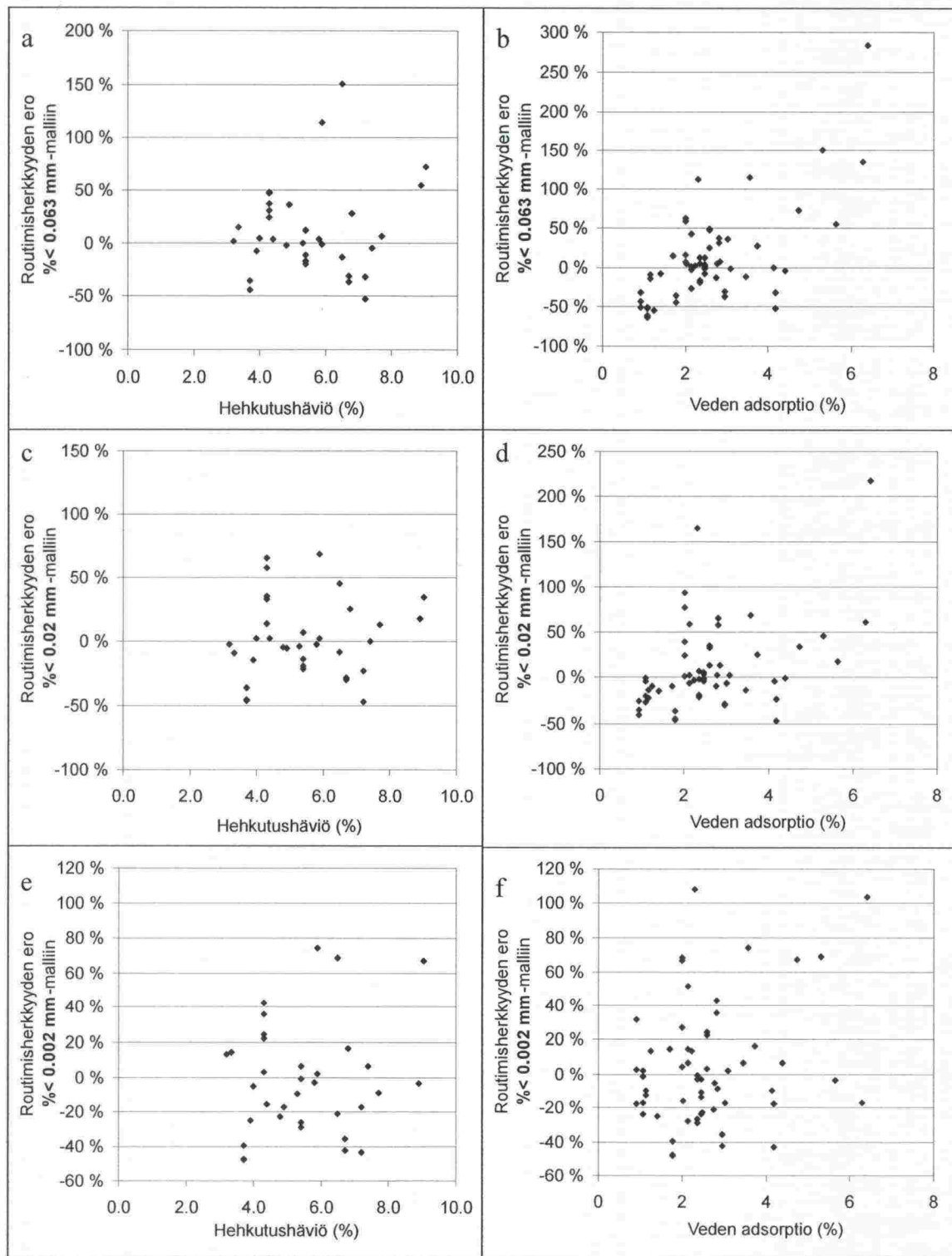
5.4.2 Hienoaineksen hehkutushäviö, veden adsorptio ja ominaispinta-ala

Hienoaineksen hehkutushäviöllä ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä hienoaines-määrään nähden poikkeaviin routimisherkkyyksiin (taulukko 5.9, kuva 5.14). Tarkastelluilla alle 10 % humuspitoisuuksilla näytteiden sisältämä orgaaninen aines ei siten vaikuttanut tietyn hienoainespitoisuuden omaavien tukikerroksnäytteiden routimisherkkyyteen.

Luvussa 4.2.2 hienoainesten veden adsorption todettiin riippuvan hyvin suurelta osin ($R^2=0.83$) hehkutushäviöstä. Siksi on hieman yllättävää, että veden adsorption korrelaatio alle 0.063 mm aineksen määrään perustuvan regressiotarkastelun residuaaleihin on varsin selvä ($R=0.67$). Käytännössä korrelaatio on kuitenkin osaksi seurausta siitä, että hienoainesten veden adsorptio korreloi myös alle routimisherkkyyttä paremmin mallintaviin alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm ainesten osuuksiin hienoaineksessa. Niinpä veden adsorption korrelaatio routimisherkkyyden poikkeamiin heikkenee selvästi (kuvat 5.14 d ja f), kun sitä tarkastellaan suhteessa tarkempien, hienoimpien lajitteiden (<0.02 ja $<0.002 \text{ mm}$) määriin pohjautuvien mallien residuaaleihin.

*Taulukko 5.9. Hienoaineslajitteiden ($<0.063 \text{ mm}$, $<0.02 \text{ mm}$ ja $<0.002 \text{ mm}$) **määriin** perustuvien routimisherkkyyksimallien suhteellisten residuaalien korrelaatiot hienoainesten hehkutushäviöihin ja veden adsorptioihin.*

	Hehkutushäviö			Veden adsorptio ennen hehkutusta		
	N	R	P	N	R	P
Residuaalit ”% $<0.063 \text{ mm}$ ”-mallissa	34	0.18	0.314	59	0.67	<0.001
Residuaalit ”% $<0.02 \text{ mm}$ ”-mallissa	34	0.10	0.561	59	0.43	0.001
Residuaalit ”% $<0.002 \text{ mm}$ ”-mallissa	34	0.15	0.400	59	0.25	0.052



Kuva 5.14. Routimisherkkyiden poikkeamat (%) hienoaineslajitteiden määriin ($\% < 0.063$ mm, $\% < 0.02$ mm ja $\% < 0.002$ mm) perustuen mallinnetuista kalliomurskeiden routimisherkkyksistä kuvattuna hehkutushäviön (vas.) ja veden adsorption (oik.) suhteen.

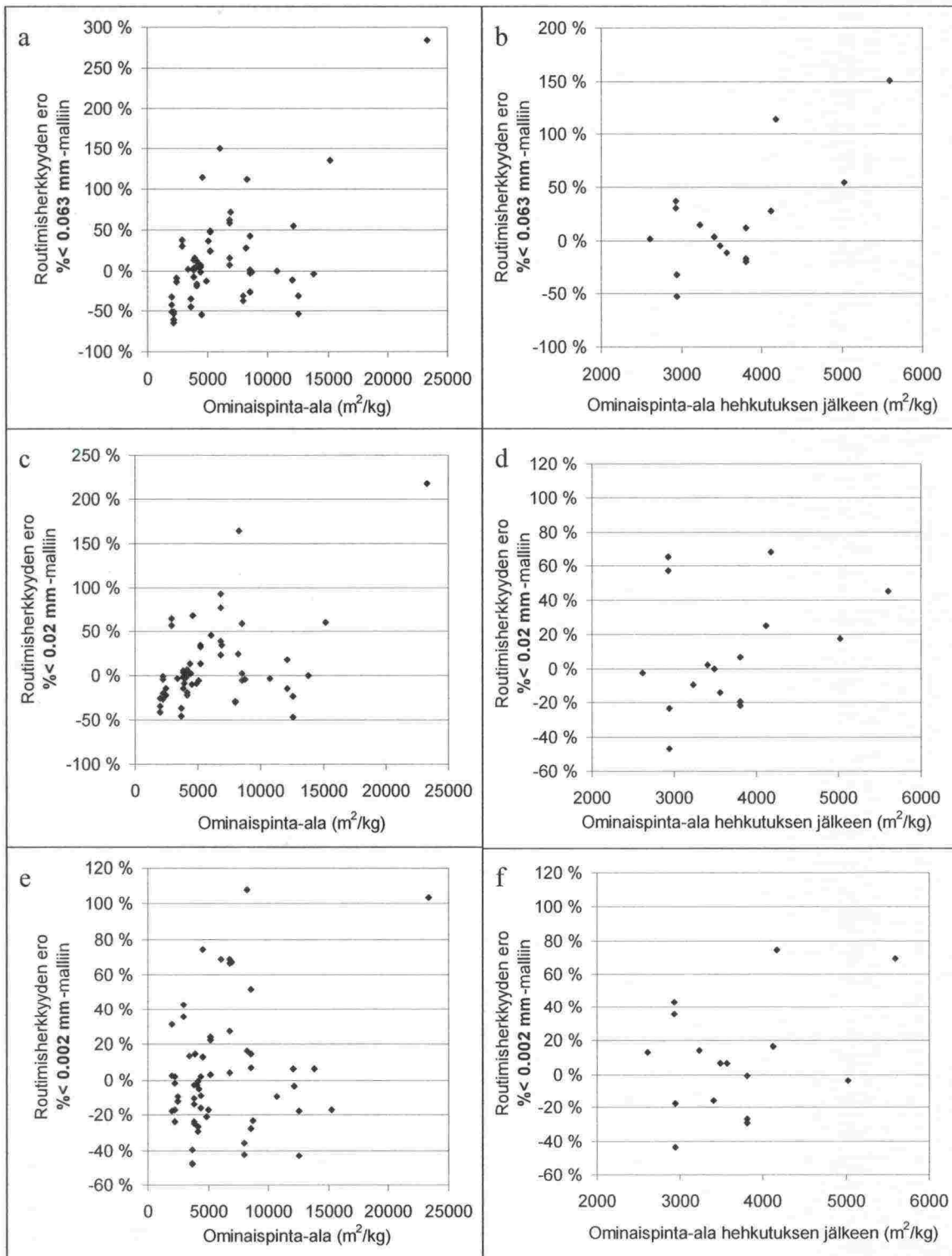
Hienoainesten ominaispinta-alojen yhteys hienoaineslajitteiden määriin perustuvien routimisherkkyysmallien residuaaleihin on esitetty vastaavasti taulukossa 5.10 ja kuvassa 5.15. Kuten edellä veden adsorption suhteen, myös ominaispinta-alan suhteen korrelaatiot heikkenevät taulukossa 5.10 tarkasteltavan mallin perustana olevan hienoaineslajitteen pienentyessä. Nämäkin korrelaatiot ovat harhaanjohtavan suuria.

Kuvista 5.15a, c ja e nähdään, että korrelaatioihin on merkittävästi myötävaikuttamassa yksittäisen havainnon sijoittuminen muista erilleen ominaispinta-ala-asteikon ääripäähän. Ilman muista poikkeavaa havaintoa korrelaatiot heikkenevät selvästi ($R_{<0.063\text{mm}}=0.31$, $R_{<0.02\text{mm}}=0.20$, $R_{<0.002\text{mm}}=0.04$). Ominaispinta-alan perusteella ei siten käytännössä voida arvioida kiviaineksen routimisherkkyyden poikkeamaa hienoainelajitteiden määrän perusteella arvioidusta routimisherkkyydestä.

*Taulukko 5.10. Hienoainelajitteiden (<0.063 mm, <0.02 mm ja <0.002 mm) **määriin** perustuvien routimisherkkyyksimallien suhteellisten residuaalien korrelaatiot hienoainesten ominaispinta-aloihin.*

	Ominaispinta-ala ennen hehkutusta			Ominaispinta-ala hehkutuksen jälkeen		
	N	R	P	N	R	P
Residuaalit "%<0.063 mm"-mallissa	59	0.55	<0.001	16	0.71	0.002
Residuaalit "%<0.02 mm"-mallissa	59	0.47	<0.001	16	0.30	0.255
Residuaalit "%<0.002 mm"-mallissa	59	0.24	0.064	16	0.34	0.196

Sekä veden adsorption että ominaispinta-alan heikko korrelaatio routimisherkkyyden poikkeamiin on osittain seurausta humuksen ja rautasaostumien määräävästä vaikutuksesta ominaispinta-alaan ja veden adsorptioon (vrt. luku 4.4.3). Humukseen tai rautasaostumiin sitoutuvan veden vaikutukset poikkeavat Niemisen (1985) havaintojen mukaan mineraaliseen hienoainekseen sitoutuvan veden vaikutuksista routimisherkkyyttä ajatellen. Näin ollen humuksen tai rautayhdisteiden määräävä vaikutus veden adsorptiossa tai ominaispinta-alassa ei välttämättä ilmene routimisherkkyyden lisäyksenä. Tästä syystä ominaispinta-alan yhteyttä poikkeaviin routimisherkkyyksiin tarkasteltiin myös hehkutuksen jälkeen määritettyjen ominaispinta-alojen osalta. Alle 0.063 mm aineksen määrään perustuvan routimisherkkyyksimallin residuaaleihin nähden näin saavutettiin huomattava ($R=0.71$) korrelaatio. Hienompien lajitteiden määriin perustuvien mallien residuaalien suhteen korrelaatiot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.



Kuva 5.15. Routimisherkkyiden poikkeamat (%) hienoaineslajitteiden määriin (%<0.063 mm, %<0.02 mm ja %<0.002 mm) perustuen mallinnetuista kalliomurskeiden routimisherkkyksistä suhteessa hienoaainesten ominaispinta-aloihin (vas.) ja hehkutuksen jälkeisiin ominaispinta-aloihin (oik.).

5.4.3 Hienoaineksen huokoisuus

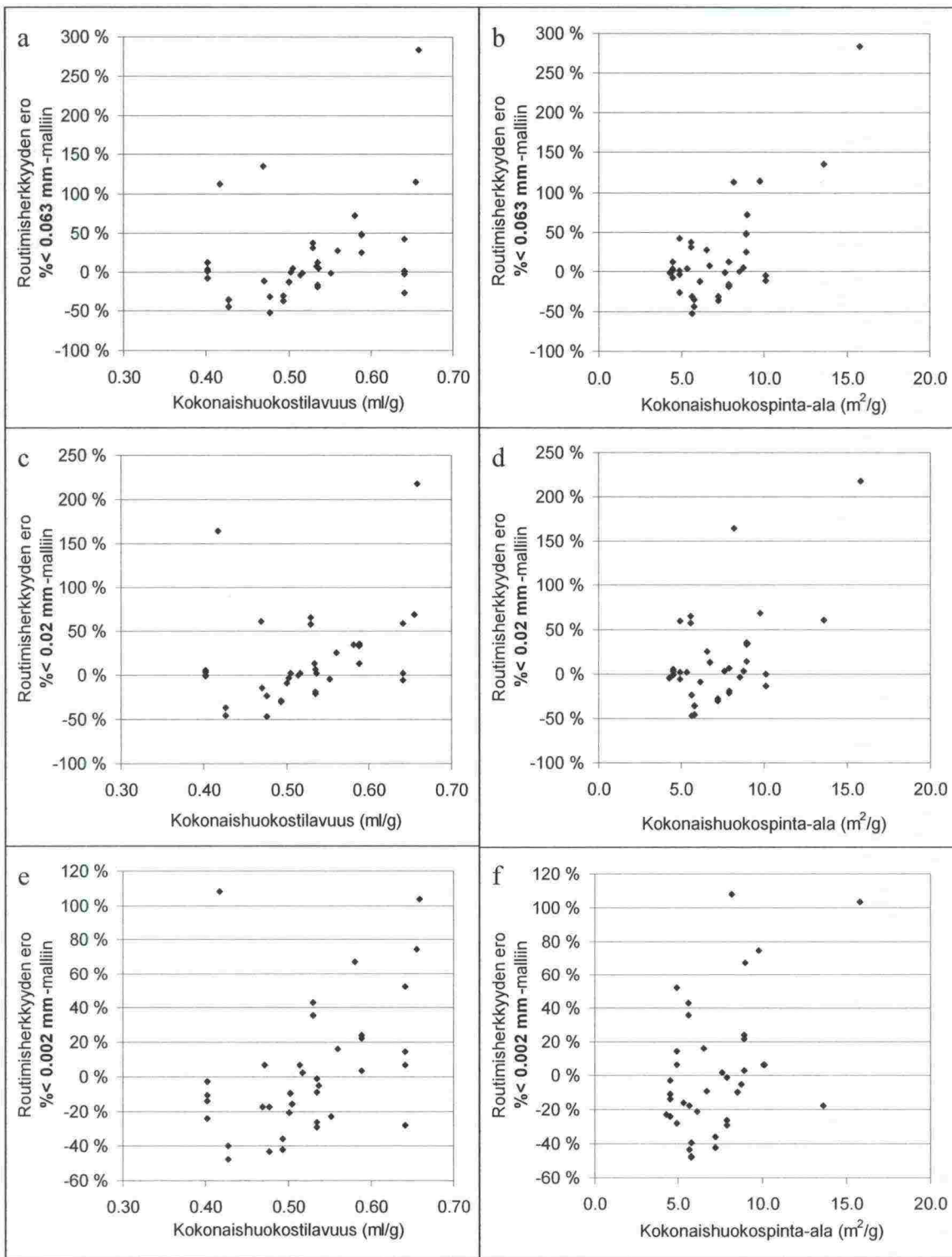
Tarkasteltujen näytteiden joukosta eniten poikkeavia huokoskokojakautumia tarkasteltiin edellä luvussa 4.4.4 (vrt. kuvat 4.36–4.38). Taulukosta 5.8 voidaan havaita kyseisten huokoskokojakutumaltaan poikkeavimpien näytteiden olleen hienoaines-määräänsä suhteutettuna selvästi tavanomaista routimisherkeempiä.

Elohopeaporosimetrillä mitatuista hienoainesten huokoisuustuloksista tarkasteltiin adsorptiohuokosten tilavuuden, adsorptio- ja kapillaarihuokosten yhteistilavuuden, kokonaishuokostilavuuden sekä kokonaishuokospinta-alan yhteyttä edellä esitetyllä tavalla arvioituihin routimisherkkyyden poikkeamiin. Parhaiten poikkeamien kanssa näistä korreloivat kokonaishuokostilavuus ja -pinta-ala, joiden kohtalaiset korrelaatiot hienoaineslajitteiden määriin perustuvien routimisherkkyyksmallien residuaaleihin on esitetty taulukossa 5.11 ja kuvassa 5.16. Erityisesti on huomioitava kohtalaiset korrelaatiot myös tarkemmin routimisherkkyyttä kuvaavien alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm ainesten määriin sidottujen mallien residuaaleihin.

Kuvista 5.16b, d ja f nähdään kahden yksittäisen suuren huokospinta-alan havainnon sijoittuvan jonkin verran muista erilleen kokonaishuokospinta-ala-asteikon yläpäässä, mikä lievästi myötävaikuttaa kohtalaisiin korrelaatioihin. Sitä vastoin kuvista 5.16a, c ja e on nähtävissä, että kokonaishuokostilavuudelle taulukossa 5.11 esitetyt kohtalaiset korrelaatiot kuvaavat todellista yhteyttä, joka olisi jopa voimakas ilman yksittäisiä poikkeavia havaintoja. Hienoaineksen kokonaishuokostilavuuden avulla voidaan siten selvästi tarkentaa hienoaineslajitteiden määriin pohjautuvia routimisherkkyyksmalleja, kuten luvussa 5.4.5 myöhemmin esitetään.

Taulukko 5.11. Hienoaineslajitteiden (<0.063 mm, <0.02 mm ja <0.002 mm) määriin perustuvien routimisherkkyyksmallien suhteellisten residuaalien korrelaatiot hienoainesten kokonaishuokostilavuuksiin ja -pinta-aloihin.

	Kokonaishuokostilavuus			Kokonaishuokos-pinta-ala		
	N	R	P	N	R	P
Residuaalit ”%<0.063 mm”-mallissa	38	0.38	0.018	38	0.71	<0.001
Residuaalit ”%<0.02 mm”-mallissa	38	0.34	0.034	38	0.55	<0.001
Residuaalit ”%<0.002 mm”-mallissa	38	0.45	0.004	38	0.43	0.007



Kuva 5.16. Routimisherkkyiden poikkeamat (%) hienoaineslajitteiden määriin (%<0.063 mm, %<0.02 mm ja %<0.002 mm) perustuen mallinnetuista kalliomurskeiden routimisherkkyyksistä suhteessa hienoaainesten kokonaishuokostilavuuksiin (vas.) ja -pinta-aloihin (oik.).

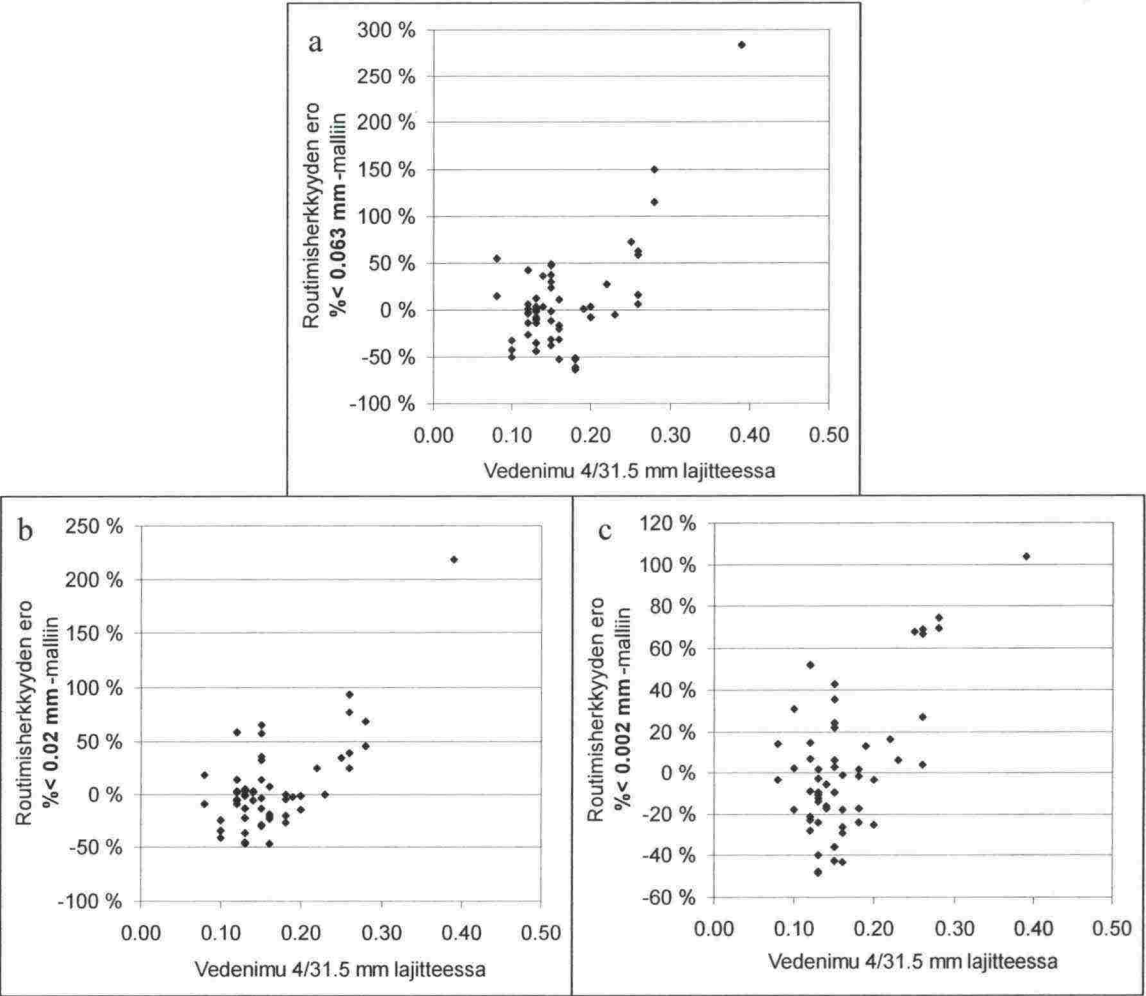
5.4.4 Karkean aineksen vedenimu

Parhaiten tarkastelluista muuttujista hienoaineslajitteiden määrien perusteella arvioituihin poikkeaviin routimisherkkyysiin korreloi lajitteen 4/31.5 mm kiviaines-

partikkeleille määritetty vedenimu. Aiemmin esitetyn mukaisessa korrelaatio-tarkastelussa vedenimun korrelaatiokerroin oli yli 0.60 kunkin hienoaineslajitteiden määriin perustuvan routimisherkkyyssmallin residuaaleihin nähden. Kuvasta 5.17 nähdään yksittäisen havaintopisteen sijoittuvan myös vedenimun suhteen erilleen asteikon yläpäähän, mutta tämän poisjättäminen vaikuttaisi korrelaatioihin vähemmän kuin aiemmin käsitellyissä parametreissa. Ilman poikkeavaa vedenimuhavaintoa korrelaatioiksi saadaan: $R_{<0.063\text{mm}}=0.47$, $R_{<0.02\text{mm}}=0.53$, $R_{<0.002\text{mm}}=0.53$.

Taulukko 5.12. Hienoaineslajitteiden (<0.063 mm, <0.02 mm ja <0.002 mm) määriin perustuvien routimisherkkyyssmallien suhteellisten residuaalien korrelaatiot lajitteen 4/31.5 mm vedenimuihin.

	Vedenimu		lajitteessa 4/31.5 mm
	N	R	P
Residuaalit ”%<0.063 mm”-mallissa	56	0.65	<0.001
Residuaalit ”%<0.02 mm”-mallissa	56	0.69	<0.001
Residuaalit ”%<0.002 mm”-mallissa	56	0.63	<0.001



Kuva 5.17. Routimisherkkyyden poikkeamat (%) hienoaineslajitteiden määriin (%<0.063 mm, %<0.02 mm ja %<0.002 mm) perustuen mallinnetuista kalliomurskeiden routimisherkkyyksistä suhteessa karkeiden partikkeleiden vedenimuihin.

5.4.5 Kiviainespartikkelien laadun huomioiva routimisherkkyyssmalli

Parhaiten kiviainesten routimisherkkyyttä voitiin mallintaa sekä tarkasteltuja kiviainesten partikkeliominaisuuksia että hienoaineslajitteiden määriä sisältävillä malleilla. Askeltavassa regressioanalyysissä tarkasteltiin routimisherkkyyttä kuvaavia parametreja selittävinä muuttujina hienoaineslajitteiden (<0.063 mm, <0.02 mm ja <0.002 mm) määrien ohella, hienoaineksen veden adsorptiota, ominaispinta-alaa, kokonaishuokostilavuutta, kokonaishuokospinta-alaa sekä karkeiden partikkelien vedenimua. Analyysissä tarkasteltiin tuloksia routanousukokeista, joiden kiviaineksista oli määritetty kaikkien riippumattomien muuttujien ominaisuudet ja jotka täyttivät luvussa 5.4.1 esitetyt kriteerit. Näin ollen analysoitavien kokeiden kokonaismääräksi saatiin 36.

Askeltavan regressioanalyysin tulos oli selvä. Kiviainesten partikkeliominaisuuksien perusteella kunkin routimisherkkyyttä kuvaavan parametrin ennustettavuutta voitiin parantaa merkittävästi verrattuna pelkästään hienoaineslajitteiden määrien perusteella tehtyihin tarkasteluihin. Aiemmissa luvuissa esitettyjä laajempien aineistojen havaintoja tukien paras korrelaatio saatiin käyttämällä riippumattomina muuttujina <0.002 mm aineksen määrää, karkeiden partikkelien vedenimua (WA_{24}) sekä hienoaineksen kokonaishuokostilavuutta (V_{kok}). Sekä vedenimu että kokonaishuokostilavuus paransivat selityssastetta selvästi. Tällöin saavutettiin parametreille h_{96h} , h_{24h} , SP_0 ja SP_0 (12-24h) yhtälöiden 5-5...5-8 nojalla selityssasteet (R^2) väliltä 0.80–0.88, jotka olivat verraten lähellä yksittäisten kiviainesten erillistarkasteluissa havaittuja hienoainesmäärän selityssasteita (vrt luku 5.2.1). Muut riippumattomat muuttujat eivät parantaneet saavutettuja selityssasteita.

$$h_{96h} = 6.88 \cdot (\% < 0.002 \text{ mm}) + 15.83 \cdot WA_{24} + 10.64 \cdot V_{\text{kok}} - 7.99 \quad (R^2=0.86) \quad (5-5)$$

$$h_{24h} = 4.51 \cdot (\% < 0.002 \text{ mm}) + 12.58 \cdot WA_{24} + 5.53 \cdot V_{\text{kok}} - 5.03 \quad (R^2=0.89) \quad (5-6)$$

$$SP_0 = 2.77 \cdot (\% < 0.002 \text{ mm}) + 10.01 \cdot WA_{24} + 4.57 \cdot V_{\text{kok}} - 3.82 \quad (R^2=0.80) \quad (5-7)$$

$$SP_0 (12-24h) = 5.03 \cdot (\% < 0.002 \text{ mm}) + 11.23 \cdot WA_{24} + 7.23 \cdot V_{\text{kok}} - 5.83 \quad (R^2=0.88) \quad (5-8)$$

, joissa

(% < 0.002 mm) = alle 0.002 mm aineksen osuus kiviaineksessa (%)

WA_{24} = vedenimu lajitteessa 4/31.5 mm (%)

V_{kok} = hienoaineksen kokonaishuokostilavuus (ml/g)

Havaittujen ja mallinnettujen routimisherkkyyssparametrien yhteydet on esitetty kuvassa 5.18. Yhtälöissä 5-9...5-12 on esitetty alle 0.02 mm aineksen määrään ja yhtälöissä 5-13...5-16 vastaavasti alle 0.063 mm aineksen määrään sidotut regressiomallit, joiden selityssasteissa ($R^2 = 0.76-0.81$) päästiin kohtuullisen lähelle alle 0.002 mm aineksen määrään sidottuja malleja. Malleja muodostettaessa riippumattomista muuttujista poistettiin alle 0.002 mm aineksen määrä. Karkeampiin hienoaineslajitteisiin sidottujen mallien rinnakkainen soveltaminen saattaa olla tarkoituksenmukaista, mikäli hienoaineksen sisäisen kokojakautuman määrittämiseen liittyy epätarkkuuksia.

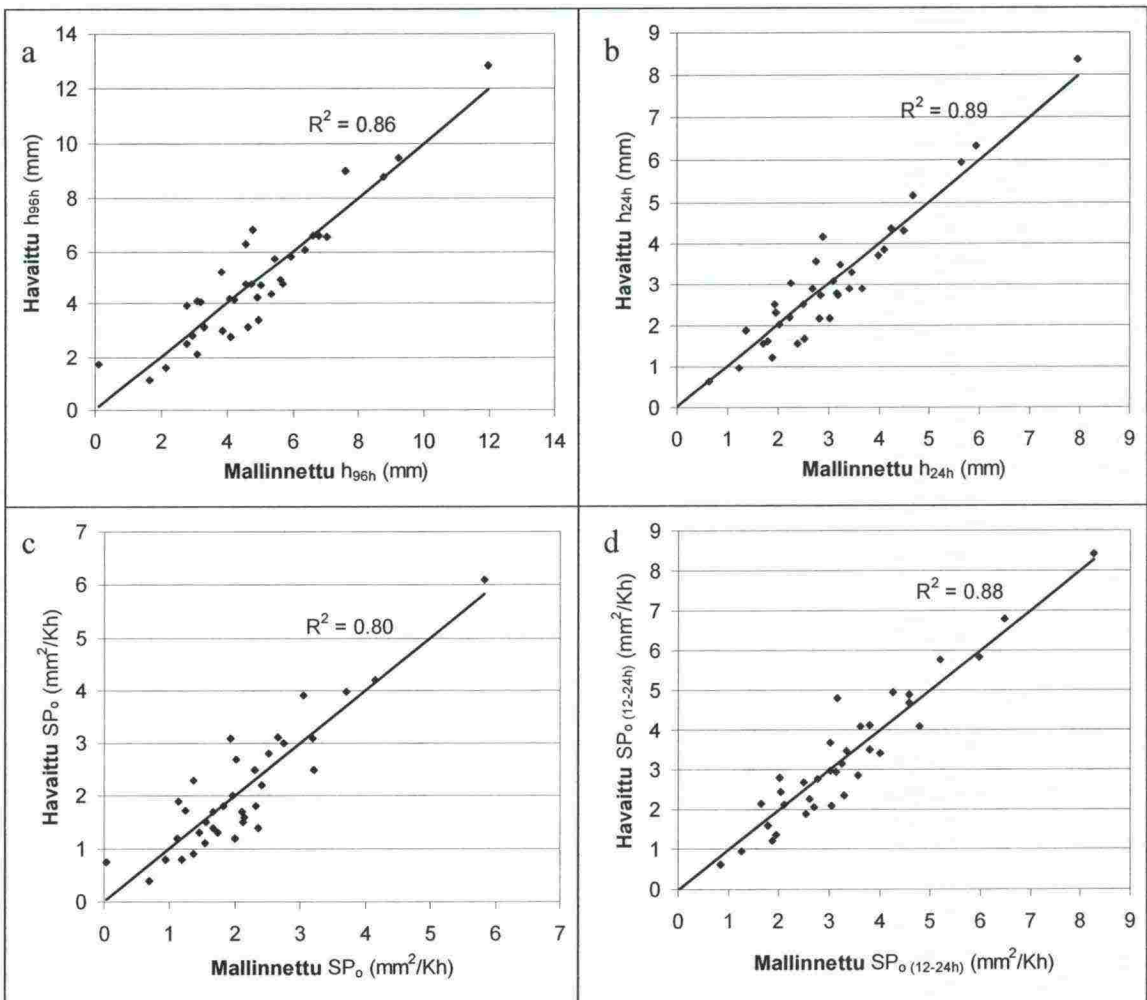
$$\begin{aligned}
 h_{96h} &= 1.46 \cdot (\% < 0.02 \text{ mm}) + 19.02 \cdot WA_{24} + 9.26 \cdot V_{\text{kok}} - 7.67 & (R^2=0.76) \text{ (5-9)} \\
 h_{24h} &= 0.95 \cdot (\% < 0.02 \text{ mm}) + 14.71 \cdot WA_{24} + 4.59 \cdot V_{\text{kok}} - 4.77 & (R^2=0.78) \text{ (5-10)} \\
 SP_o &= 0.63 \cdot (\% < 0.02 \text{ mm}) + 11.17 \cdot WA_{24} + 4.14 \cdot V_{\text{kok}} - 3.86 & (R^2=0.77) \text{ (5-11)} \\
 SP_o(12-24h) &= 1.10 \cdot (\% < 0.02 \text{ mm}) + 13.44 \cdot WA_{24} + 6.33 \cdot V_{\text{kok}} - 5.75 & (R^2=0.81) \text{ (5-12)}
 \end{aligned}$$

$$h_{96h} = 0.79 \cdot (\% < 0.063 \text{ mm}) + 23.46 \cdot WA_{24} + 9.93 \cdot V_{\text{kok}} - 8.90 \quad (R^2=0.76) \quad (5-13)$$

$$h_{24h} = 0.51 \cdot (\% < 0.063 \text{ mm}) + 17.59 \cdot WA_{24} + 4.99 \cdot V_{\text{kok}} - 5.53 \quad (R^2=0.78) \quad (5-14)$$

$$SP_o = 0.33 \cdot (\% < 0.063 \text{ mm}) + 13.08 \cdot WA_{24} + 4.35 \cdot V_{\text{kok}} - 4.29 \quad (R^2=0.76) \quad (5-15)$$

$$SP_o(12-24h) = 0.59 \cdot (\% < 0.063 \text{ mm}) + 16.80 \cdot WA_{24} + 6.76 \cdot V_{\text{kok}} - 6.58 \quad (R^2=0.80) \text{ (5-16)}$$



Kuva 5.18. Havaittujen ja yhtälöillä 5-5...5-8 mallinnettujen routimisherkkyttä kuvaavien parametrien h_{96h} , h_{24h} , SP_o ja $SP_o(12-24h)$ korrelaatiot.

6 SYKLISET TOISTOKUORMITUSKOKEET

6.1 Tulosten yleistarkastelu

6.1.1 Tehdyt kokeet

Junakuormituksen simuloimiseksi kehitetty toistokuormituskoelaitteisto sekä yleiset koejärjestelyt ja tehdyt mittaukset on kuvattu luvussa 3.4. Tavoitteena toistokuormituskokeissa oli tarkastella miljoonia kertoja toistuvan junakuormituksen vaikutusta rata-rakenteessa käytettävien kalliomurskeiden, erityisesti eristys- ja välikerrosmurskeiden hienonemiseen. Voimakkaasti nopeutetussa laboratoriokuormituksessa kymmenien vuosien junaliikennettä vastaava kuormitus saatiin tiivistetyksi muutaman viikon mittaiseen kokeeseen. Suhteellisen lyhyt kokeen kesto mahdollisti useiden hienonemiseen vaikuttavien eri muuttujien vaikutuksen tarkastelun. Kaikkiaan toistokuormituskokeita tehtiin 35 kappaletta ajalla tammikuu 2003–maaliskuu 2005.

Tehdyt kokeet on listattu taulukossa 6.1. Taulukossa on kuvattu kokeiden kuormitus-, materiaali- ja koeolosuhdetiedot sekä kokeiden tuloksena saadut kiviainesten hienonemis- ja muodonmuutosparametrit, jotka esitellään seuraavassa luvussa (6.1.2). Kokeet on jaettu taulukossa 6.1 vaakaviivoilla kolmeen osioon, joissa koetekniset olosuhteet ovat vertailukelpoisia. Merkittävimpiä koeteknisiä muutoksia olivat siirtyminen leveydeltään 150 mm kuormituslevyistä 250 mm levyihin ensimmäisten kolmen kokeen jälkeen sekä peltilevyn poisotto pohjakumin päältä kokeen 22 jälkeen. Muita kokeen tuloksiin vaikuttavia teknisiä kysymyksiä olivat verkkokankaan käyttö kiviaineksen jaottelussa sekä kuormituslevyjen hallitsemattomien liikkeiden estämiseksi käytetyt ratkaisut. Koeteknisiä järjestelyjä on käsitelty luvussa 3.4 ja niiden vaikutusta kokeiden tuloksiin jäljempänä luvussa 6.2. Taulukossa 6.1 on esitetty kussakin kokeessa lihavoituna merkittävimmät koetekniset huomiot sekä toisaalta koeolosuhteiden ja kiviainestietojen osalta erityisesti tarkastelun alaisena olleet parametrit. Kiviainesten lujuus- ja muototutkimusten tulokset on esitetty liitteessä 3.

Liitteessä 4 on esitetty materiaalien pesuseulotut raekokojakautumat ennen ja jälkeen kunkin kokeen. Seuraavassa kuvataan lyhyesti kuhunkin kokeeseen liittyvät päähuomiot koeteknisistä muutoksista, koeolosuhteista sekä tuloksista. Kutakin kokeissa tarkasteltua muuttujaa käsitellään erikseen tarkemmin myöhemmissä luvuissa.

Taulukko 6.1. Tehtyjen toistokuormituskokeiden kuormitus-, materiaali- ja olosuhdetiedot sekä kokeista saadut hienonemis- ja muodonmuutosparametrit.

Koe	Koetekniikka					Koeolosuhteet ja kiviaines							Tulosparametrit				
	Verkkokangas kapeat	kuormalevyt	Ohjuri männät	Ei pohjapeltiä	Ei sivukumeja	Kuorma (kPa)	Syklimäärä (milj.)	Pohjakumi (mm)	Kiviaines	Raekoko (mm)	Vesi *)	Kaidesepeliraeko	Tukemissimuloin	Hi _{25/16/8/4} mm	Hi _{0.063/0.125/0.25} mm	palautuva siirtymä	Kuorm.levyn painuma (mm)
1	X	X				300	0.3	50	Lakalaiva	4/32				2.3	0.6	x	x
2	X	X				300	6.0	20	Lakalaiva	4/32				0.9	0.2	2.1	3.3
3	X	X				300	1.3	40	Lakalaiva	4/32				1.2	0.4	2.6	x
4	X		X			225	6.0	50	Lakalaiva	4/32				7.8	5.6	3.6	22.8
5			X			225	6.0	50	50+700	2/50				0.4	0.2	2.5	3.4
6			X			225	6.0	50	50+700	2/50	X			0.3	0.3	2.5	2.1
7						225	3.6	50	50+700	4/32				x	x	2.4	5.1
8						225	6.0	50	50+700	8/40				0.8	0.1	2.6	3.6
9						225	6.0	50	Lakalaiva	4/32				1.3	1.3	3.0	7.8
10						225	6.0	50	Lakalaiva	4/32				1.0	0.6	2.9	4.8
11						225	6.0	50	50+700	0/40				0.3	1.1	2.4	3.1
12						225	6.0	100	50+700	8/40				0.9	0.2	3.6	4.0
13						300	0.5	50	50+700	0/50	X			2.4	9.6	5.5	x
14						225	3.0	50	50+700	0/50	X			1.7	8.8	4.5	16.6
15						225	3.0	50	80+500	0/50	X			2.1	9.3	5.4	22.5
16						225	3.0	50	85+600	0/50	X			3.4	10.9	5.5	32.3
17						150	3.0	50	50+700	0/50	7%			0.4	2.2	2.6	7.8
18						150	3.0	50	85+600	0/50	7%			1.1	2.7	2.6	12.3
19	X					225	3.0	50	50+700	4/32				6.6	3.0	2.4	27.3
20		X		X		300	3.0	30	50+700	16/63		X		0.8	0.3	3.3	5.7
21		X		X		300	3.0	30	50+700	16/63		X	X	13.1	2.0	3.1	x
22		X		X		225	6.0	50	50+700	0/50	5%			1.0	0.2	2.9	10.6
23			X	X	X	225	3.0	50	50+700	4/32				5.0	2.8	1.8	16.4
24				X	X	225	3.0	50	50+700	0/50				2.3	1.9	2.5	9.5
25				X	X	150	3.0	50	50+700	4/32				1.7	1.0	1.2	11.1
26				X	X	225	3.0	50	50+700	4/32				9.1	3.5	2.1	23.7
27				X	X	225	3.0	10	50+700	4/32				2.3	1.0	1.5	16.9
28				X	X	300	3.0	10	50+700	4/32				5.7	2.1	1.8	26.4
29				X	X	225	3.0	50	50+700	4/63				3.4	3.0	2.8	13.9
30				X	X	225	3.0	50	50+700	1/40				6.2	2.9	2.1	14.4
31				X	X	225	3.0	50	Lakalaiva	0/40				1.7	1.5	2.9	7.3
32				X	X	225	3.0	50	85+600	0/40				1.2	1.0	3.0	5.1
33				X	X	225	3.0	50	88+800	0/40				4.8	2.5	2.3	20.8
34				X	X	225	3.0	50	80+500	0/40				4.7	2.3	2.2	16.5
35				X	X	225	3.0	50	88+200	0/40				8.3	2.6	2.0	19.7

*) Vesi-sarakkeessa X-merkintä tarkoittaa vedellä kyllästettyä tilaa

Kokeet 1, 2 ja 3

Käytettyjen kapeiden kuormituslevyjen takia ensimmäiset kolme koetta poikkesivat selvästi myöhemmistä kokeista. Kapeiden (leveys 150 mm) kuormituslevyjen hallitsematon kiertyminen ja kääntyily rajoittivat kokeen kestoa joustavalla pohjalla (kokeet 1 ja 3) voimakkaasti. Myös käytetty kuormitustaso (300 kPa) oli suurempi kuin myöhemmissä kokeissa. Erityisesti kapeiden kuormituslevyjen johdosta kokeiden 1–3 tuloksia ei voitu suoraan vertailla muiden kokeiden tulosten kanssa. Kokeiden havaintojen perusteella kuormituslevyt muutettiin leveämmiksi (250 mm) ja järjestelyyn tehtiin joitakin pienempiä muutoksia. Jatkossa tehdyt koetekniset muutokset olivat pohjakumin päällä olevaa peltilevyä lukuun ottamatta (vrt. luku 6.2.2) vaikutuksiltaan vähäisiä.

Koe 4

Kokeessa 4 hienoneminen oli hyvin voimakasta. Vasta myöhemmin (kokeen 10 jälkeen) havaittiin, että pääasiallinen syy hienonemiseen oli kokeessa käytetty verkkokangaspussi (vrt. kuva 3.17b), jolla kiviaines pyrittiin erottelemaan laatikon pituussuunnassa kolmeen osaan. Kuormituslevyjen välillä vertikaalitasossa sijainnut verkkokangas muodosti kiviainepartikkeleiden välisen liukupinnan, jonka seurauksena partikkelit hioutuivat dramaattisella tavalla verrattuna tilanteeseen täysin vastaavassa kokeessa ilman verkkokangasta (koe 9 ja 10). Havainto oli erittäin yllättävä, mutta erinomainen vahvistus koko laitteistokehittelyn perushypoteesille koskien kuormitussuunnan vaihtumisen merkittävää vaikutusta hienonemiseen. Toisaalta todellista kuormitus-tilannetta ajatellen huojentavaa oli se, että merkittävän liukupinnan muodostuminen edellytti verkkokankaan mukanaoloa, eikä pahin uhkakuva toteutunut ilman verkko-kangasta tehdyissä rinnakkaiskokeissa 9 ja 10.

Koe 5

Kokeeseen 4 nähden laajemmalla (2/50 mm) raekokojakautumalla ja ennen kaikkea ilman kangaspussia tehty koe, jossa hienonemista ei käytännössä tapahtunut.

Koe 6

Muilta osin koetta 5 vastaava, mutta koe 6 tehtiin vedellä kyllästetyssä tilassa. Vedenpinta ulotettiin kuormituslevyjen tasolle. Kiviaines ei alun perin sisältänyt raekooltaan alle 2 mm rakeita. Hienonemista ei käytännössä tapahtunut.

Koe 7

Kokeita 9 ja 10 vastaava, mutta eri kiviainekselle tehty koe, joka jouduttiin keskeyttämään 3.6 miljoonan kuormitus syklin jälkeen tapahtuneen teknisen ongelman takia. Kiviaineksen hienonemista ei voitu selvittää seulonnalla, mutta silmämääräisen arvion perusteella hienoneminen oli hyvin vähäistä. Verkkokangasta ja kiviaineslaatua lukuun ottamatta täysin vastaavassa kokeessa 4 tapahtunut voimakas hienoneminen herätti tässä vaiheessa suurta hämmennystä, kunnes hienonemisen syy saatiin selvitettyksi.

Koe 8

Koe tehtiin vielä kokeeseen 7 nähden tasarakeisemmalle (8/40 mm) kiviainekselle, mutta hienoneminen tässäkin kokeessa oli käytännössä olematonta.

Kokeet 9 ja 10

Keskenään vastaavat kokeet. Ainoa ero kokeeseen 4 oli verkkokankaan puuttuminen. Hienoneminen oli kokeeseen 4 verrattuna radikaalisti vähäisempää, mutta kokeista 5–8 poiketen hienonemista kuitenkin selkeästi tapahtui. Vaikutti siltä, että kuormitusolosuhteet olivat sellaiset, jossa tarkastellun kiviaineksen hienonemisen käynnistyminen oli rajatapaus. Tätä ajatusta tuki kokeiden 9 ja 10 välillä hienonemisen vertailuparametreissa havaittu ero sekä toisaalta voimakas hienoneminen ainoastaan verkkokankaan mukana ololla kokeista 9 ja 10 poikenneessa kokeessa 4.

Koe 11

Kiviaineksen raekokojakautumaan (0/40 mm) otettiin mukaan hienorakeinen aines. Kuivana tehdyssä kokeessa hienoneminen oli siitä huolimatta olematonta.

Koe 12

Muilta osin koetta 8 vastaava, mutta kokeessa 12 pohjan joustavuutta suurennettiin lisäämällä sienikumipaksuutta tavanomaisesta 50 mm:stä 100 mm:iin. Kiviaines ei käytännössä hienontunut kokeessa.

Koe 13

Koe ääriolosuhteissa. Kuormitustaso korotettiin aiemmasta 225 kPa:sta 300 kPa:iin. Rakeisuudeksi valittiin runsaasti hienorakeista ainesta sisältävä raekokojakautuma. Lisäksi kiviaines kyllästettiin vedellä ulottamalla vedenpinta kuormituslevyjen tasolle. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksena kiviaines hienoni erittäin voimakkaasti. Vesi ja hienorakeinen aines muodostivat hiovan massan, joka liikkui kuormituspulssien aiheuttaman huokosylipaineen vaikutuksesta kiviaineksen huokostilassa. Seurauksena oli erityisesti hienorakeisten laitteiden hioutuminen hyvin hienojakoiseksi hienoainekseksi, jossa alle 0.002 mm hiukkasten osuus oli suuri. Koe jouduttiin keskeyttämään ennenaikaisesti 0.5 miljoonan kuormitus syklin jälkeen kuormituslevyjen voimakkaan kaivautumisen vuoksi.

Kokeet 14–16

Kokeen 13 jatkona 225 kPa kuormitustasolla veden ja hienorakeisen aineksen yhteisvaikutusta tarkastelevia kokeita. Kukin koe tehtiin eri kiviainekselle samalla rakeisuudella (0/50 mm), jossa raekooltaan alle 4 mm ainesta oli alun perin noin 12 % ja hienoainesta 1–2 %. Hienoneminen kokeissa oli hiovan liejumassan aiheuttamana koetta 13 vastaavalla tavalla erittäin voimakasta. Kiviainesten välinen hienonemisjärjestys korreloi hioutuvuuden keston (kuulamyly- ja micro-Deval-arvo) kanssa.

Kokeet 17 ja 18

Kokeet 17 ja 18 olivat jatkoa edellisille veden ja hienorakeisen aineksen yhteisvaikutusta tarkastelleille kokeille. Kokeissa kiviainekseen lisättiin sekoitusvaiheessa 7 % vettä. Kiviaines ei pystynyt sitomaan kaikkea vettä, jonka seurauksena vedenpinta asettui noin 8–10 cm kiviaineksen pohjatason yläpuolelle, eli noin neljännos materiaalista oli vedellä kyllästettynä. Kuormitustaso alennettiin 150 kPa:iin. Hienoneminen kokeissa oli määräävästi vähäisempää verrattuna täysin kyllästettyinä tehtyihin kokeisiin 13–16. Hienorakeisten laitteiden hioutumista hienoainekseksi tapahtui jossain määrin myös kokeissa 17 ja 18.

Koe 19

Koe 19 tehtiin, jotta verkkokankaan määräävästä vaikutuksesta hienonemisessa voitiin varmistua. Järjestelyt olivat muilta osin yhtenevät kokeen 7 kanssa, mutta kokeessa 19 kiviaines jaettiin kolmeen osaan kuormituslevyjen väleihin vertikaalitasoon asennettuja verkkokankaita käyttäen. Hienoneminen oli erittäin voimakasta, mikä lopullisesti varmisti verkkokankaan vaikutuksen, sillä vastaavassa ilman verkkokangasta tehdyssä kokeessa 7 hienoneminen oli hyvin vähäistä.

Koe 20

Raidesepeliraekokoa mukailevalla (16/63 mm) kiviaineksella, 300 kPa kuormitustasolla ja 30 mm sienikumipaksuudella tehty koe. Kiviaines ei käytännössä hienontunut.

Koe 21

Lisäyksenä kokeen 20 järjestelyihin oli poravasarella (Hilti TE 75) tehty tukemisen simulointi. Tukemishakulla varustetulla poravasarella pyrittiin simuloimaan tukemista noin 200000 kuormitusyökin välein kokeen kuluessa, yhteensä 11 kertaa. Kussakin tukemistapahtumassa tukemishakku työnnettiin ylösnostettujen kuormituslevyjen alle neljä kertaa kunkin kuormituslevyn kummaltakin sivulta. Tukeminen ja sen seurauksena tapahtunut tiivistyneen kiviaineksen sekoittuminen aikaansaivat erittäin voimakasta hienonemista. Erityisesti karkeiden rakeiden hienoneminen oli merkittävästi suurempaa kuin missään muussa tarkastellussa koejärjestelyssä.

Koe 22

Täydennys veden ja hienorakeisen aineksen yhteisvaikutuksen tarkasteluun. Koe tehtiin 5 % vesipitoisuudella, jonka kiviaines pystyi sitomaan. Tällöin kiviaineksen huokos-tilassa ei esiintynyt vapaata vettä toisin kuin kokeissa 17 ja 18. Kiviaines ei käytännössä hienontunut lainkaan.

Koe 23

Kokeeseen 23 merkittävä muutos oli paksuudeltaan 0.5 mm peltilevyn poistaminen pohjan joustavan sienikumikerroksen päältä. Peltilevyn tarkoitus oli ollut estää yksittäisten kiviainesrakeiden voimakas tunkeutuminen pohjakumiin jakamalla kumiin kohdistuvaa kuormitusta hieman tasaisemmin. Vaikea kysymys on se, kumpi tilanne kuvaa paremmin todellista pohjamaata. Arviointi ei ole riippuvainen kokonaisjousta, sillä se ei osoittautunut pellittömässä tilanteessa suuremmaksi kuin vastaavassa kokeessa peltilevyn kanssa. Joka tapauksessa peltilevyn poisottaminen lisäsi selvästi kiviaineksen hienonemista ja teki siten mahdolliseksi eri muuttujien vaikutuksen tarkastelun olosuhteissa, joissa aiemmin peltilevyä käytettäessä hienonemista ei ollut lainkaan tapahtunut. Todelliseen ratarakenneympäristöön suoraan sovellettavia absoluuttisia lukuarvoja hienonemistulokset eivät ole kummassakaan tapauksessa. Peltilevyn poisottamisesta johtuen kokeet 23:sta eteenpäin sopivat kuitenkin vertailtaviksi vain keskenään, eivät aiempien kokeiden kanssa.

Koe 23 tehtiin 225 kPa kuormitustasolla ja 50 mm sienikumipaksuudella raekoko-jakautuman 4/32 mm kiviainekselle. Kuormituslevyjen kiertymisen estämiseksi kokeessa käytettiin ohjurimäntiin perustuvaa ratkaisua. Myöhemmissä, samoin kuin pääosassa aiemmista kokeista tarkoitukseen käytettiin sidelattaratkaisua, koska ohjurimäntien ja -holkkien välillä vaikuttavan kitkan vuoksi todellinen kiviainekseen kohdistuva kuormitus vääristyi jossain määrin tavoiteltua pienemmäksi (vrt. luku 3.4.1

ja koe 26). Hienoneminen kokeessa oli merkittävää. Peltilevyn poisoton vaikutus ilmenee verrattaessa tulosta kokeen 7 hyvin vähäiseen hienonemiseen. Toisaalta on hieman yllättäen huomattava, että kuormituslevyjen palautuva kokonaisjousto oli ilman peltilevyä tehdyssä kokeessa 23 jopa pienempi kuin peltilevyn kanssa tehdyssä kokeessa 7.

Koe 24

Perustapaukseksi kiviaineslaatuojen väliseen vertailuun valittu koe, jossa kiviaineksen raekokojakautumana on 0/50 mm, kuormitustasona 225 kPa ja pohjakumipaksuutena 50 mm. Kokeesta 23 alkaen pohjakumin päällä ei käytetty peltilevyä. Laajemman raekokojakautuman ansiosta hienoneminen oli selvästi vähäisempää kuin kokeessa 23 (tai kokeessa 26).

Koe 25

Muilta osin koetta 23 (tai oikeastaan kuormituslevyjen sideratkaisun vuoksi koetta 26) vastaava tilanne, mutta kuormitustasoa alennettiin 225 kPa:sta 150 kPa:iin. Seurauksena oli hienonemisen erittäin huomattava väheneminen.

Koe 26

Koe 26 vastasi järjestelyiltään koetta 23 muilta osin, mutta kuormituslevyjen hallitsemattomien liikkeiden estämiseksi käytettiin kokeen 23 ohjurimäntä-holkki-ratkaisun sijaan sidelattarakaisua. Tällä saavutettiin se, että kokeen 26 tulos on koeteknisten olojen suhteen täysin vertailukelpoinen muiden kokeen 23 jälkeen tehtyjen kokeiden kanssa. Hienoneminen kokeessa 26 oli jonkin verran voimakkaampaa kuin kokeessa 23. Tämä tuki käsitystä todellisen kuormituksen pienenemisestä kitkan vaikutuksesta kokeen 23 mukaisessa ohjuriratkaisussa. Kokeessa käytetyn melko tasarakeisen (4/32 mm) kiviaineksen hienoneminen oli merkittävästi suurempaa verrattuna saman kiviaineksen hienonemiseen laajemmalla rakeisuudella 0/50 mm muilta osin vastaavissa olosuhteissa tehdyssä kokeessa 24. Kokeen 26 koetilanne oli rakeisuuden, kuormitustason ja pohjan jouston vaikutusten vertailussa perustapaus, johon yksittäisten muutosten vaikutuksia oli luontevaa verrata.

Koe 27

Pohjan joustokumin paksuutta vähennettiin kokeessa 26 käytetystä 50 mm:stä 10 mm:iin. Tämän seurauksena hienoneminen väheni ratkaisevasti. Hienoneminen oli likimäärin samansuuruista kuin pienemmällä kuormitustasolla ja suuremmalla pohjakumipaksuudella tehdyssä kokeessa 25.

Koe 28

Kokeeseen 26 verrattuna kuormitustasoa kasvatettiin 225 kPa:sta 300 kPa:iin ja pohjan joustokumipaksuutta vähennettiin 50 mm:stä 10 mm:iin. Muutosten seurauksena hienoneminen oli selvästi vähäisempää kuin kokeessa 26, mutta toisaalta selvästi voimakkaampaa kuin kokeissa 25 tai 27.

Koe 29

Kiviaineksen rakeisuutta muutettiin kokeesta 26 (4/32 mm) karkeammaksi ja seka-rakeisemmaksi (4/63 mm). Muutoksen seurauksena etenkin karkeiden kiviainesrakeiden hienoneminen väheni selvästi.

Koe 30

Kiviaineksen rakeisuutta muutettiin kokeesta 26 (4/32 mm) sekarakeisemmaksi (1/40 mm). Muutoksen seurauksena etenkin karkeiden kiviainesrakeiden hienoneminen väheni hieman, mutta oli kuitenkin selkeästi voimakkaampaa kuin kokeessa 29.

Kokeet 31–35

Kokeet 31–35 tehtiin eri kiviaineksille kokeen 24 mukaisissa järjestelyissä, jolloin raekokojakautuma oli 0/50 mm, kuormitustaso 225 kPa ja pohjan joustokumipaksuus 50 mm. Tarkastelussa oli kiviaineslaadun vaikutus hienonemiseen. Kuivana tehdyissä kokeissa hienonemisen havaittiin korreloivan lähinnä kiviaineksen iskunkestävyyttä kuvaavien parametrien (Los Angeles-luku, haurausarvo) kanssa.

6.1.2 Vertailuparametrit

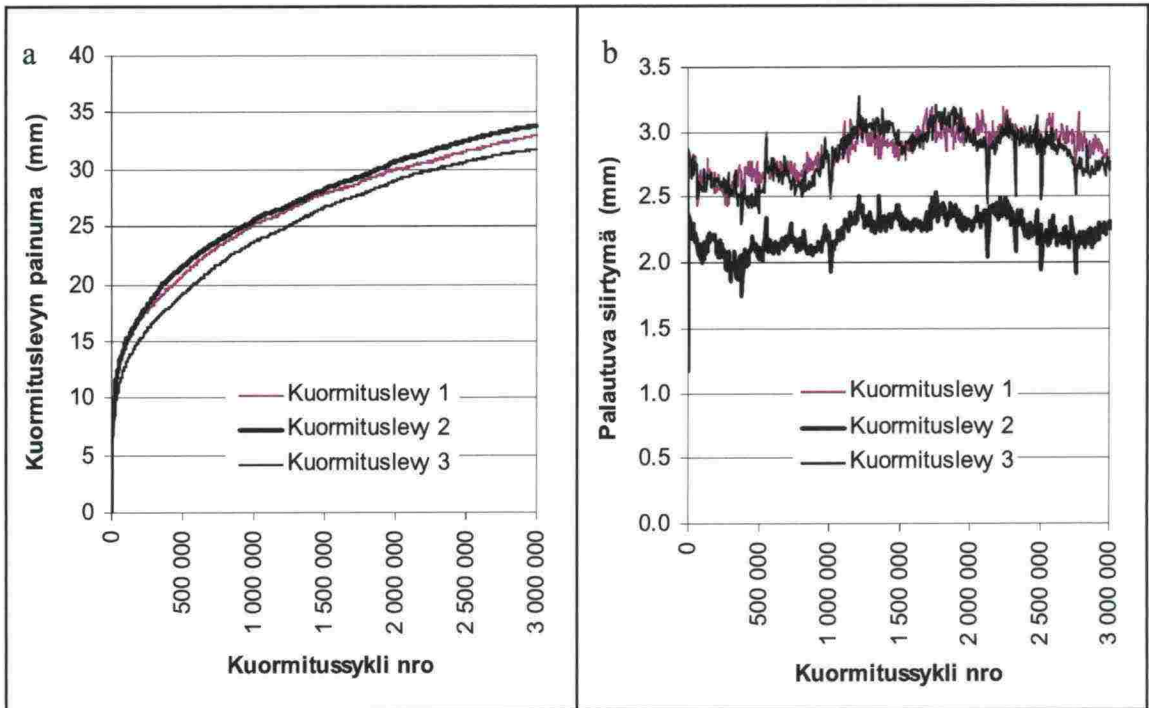
Eri kokeissa tapahtuneen hienonemisen ja muodonmuutuskäyttäytymisen vertailemiseksi tuloksista määritettiin joitakin vertailuparametreja. Hienonemisen vertailua alun perin erilaisen raekokojakautuman omaavien kiviainesten välillä ei yleisessä tapauksessa ollut mielekäästä perustaa johonkin yksittäisen seulakoon läpäisyprosentin muutokseen. Hienonemista vertailtaessa tuli ottaa huomioon koko raekokojakautuman muutokset. Tästä syystä karkeampien rakeiden hienonemista kuvaavaksi vertailuparametreiksi valittiin kokeessa tapahtunut 25, 16, 8 ja 4 mm seulojen läpäisyprosenttien keskimääräinen muutos, $Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}}$ (kaava 6-1). Vastaavasti hienorakeisten lajitteiden hienonemisen vertailuparametriksi valittiin 0.063, 0.125 ja 0.25 mm seulojen läpäisyprosenttien keskimääräinen muutos, $Hi_{0.063/0.125/0.25 \text{ mm}}$ (kaava 6-2). Valitut parametrit mahdollistivat tulosten kvantitatiivisen vertailun, jonka lisäksi hienonemistarkastelussa huomioitiin raekokojakautuman yleiset muutokset.

$$Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}} = \frac{\Delta(< 25 \text{ mm}) + \Delta(< 16 \text{ mm}) + \Delta(< 8 \text{ mm}) + \Delta(< 4 \text{ mm})}{4} \quad (6-1)$$

$$Hi_{0.063/0.125/0.25 \text{ mm}} = \frac{\Delta(< 0.063 \text{ mm}) + \Delta(< 0.125 \text{ mm}) + \Delta(< 0.25 \text{ mm})}{3}, \text{ joissa} \quad (6-2)$$

$\Delta(< X \text{ mm})$ = kokeessa tapahtunut läpäisyprosentin muutos kooltaan X mm seulalla

Siirtymien osalta vertailuparametreina tarkasteltiin kuormituslevyjen pysyvää painumaa sekä kuormituspulssin aikana palautuvaa kuormituslevyjen liikettä. Kuormituslevyjen painuma oli kokeen alussa voimakasta materiaalin vielä tiivistyessä (esim. kuva 6.1a). Alkutiivistyksen tehokkuuden ja muiden kokeen alun satunnaistekijöiden vaikutusten eliminoimiseksi vertailuparametriksi valittiin kolmen kuormituslevyn keskimääräinen kuormitusvälillä 0.5–3.0 miljoonaa sykliä muodostunut pysyvä painuma, joka näin ollen kuvasi paremmin materiaalin pitkäaikaiskäyttäytymistä. Kuormituslevyjen painuminen oli useissa kokeissa, etenkin suuremmilla kuormitustasoilla, keskenään selvästi epätasaisempaa kuin kuvan 6.1a mukaisessa kokeessa 18.



Kuva 6.1. Esimerkki (koe 18) kuormituslevyjen pysyvän painuman (vas.) kehitymisestä ja kuormituspulssin aikana tapahtuvan kuormituslevyjen palautuvan liikkeen suuruudesta (oik.) kokeen edetessä.

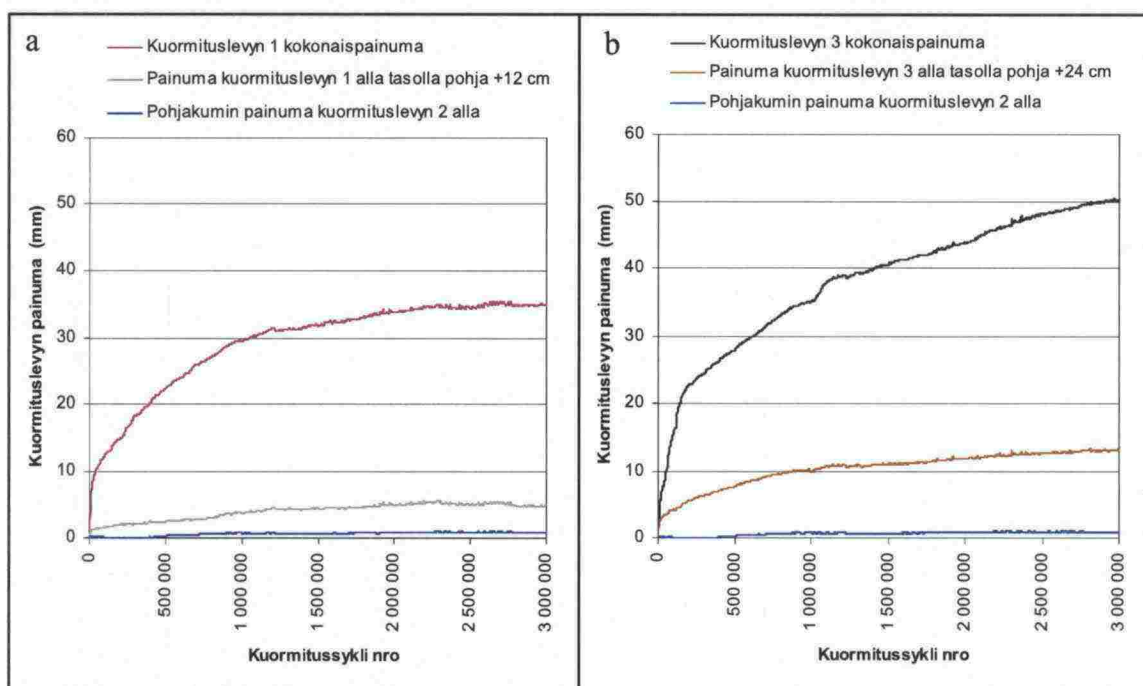
Toisena siirtymäparametrina tarkasteltiin kuormituspulssin alaisena tapahtuvaa tutkittavan kiviaineksen sekä sen alapuolisen pohjakumin muodostamaa kimmoista kokonaisjoustoja. Jousto mitattiin pulssin aikana tapahtuvan kuormituslevyn palautuvasta liikkeestä. Vertailuparametriksi valittiin kolmen kuormituslevyn perusteella mitattu keskimääräinen palautuva liike välillä 0–3.0 miljoonaa sykliä. Keskimmäisen kuormituslevyn palautuva liike oli kokeissa keskimäärin noin 20 % pienempi kuin reunimmaisten levyjen (esim. kuva 6.1b). Tämä oli seurausta koetuslaatikon dimensioihin ja joustojärjestelyihin liittyvistä koeteknisistä rajoitteista (vrt. luku 6.1.3).

6.1.3 Yleisiä siirtymämittaushavaintoja

Edellisessä luvussa esitettyjen siirtymien vertailuparametrien ohella joissakin kokeissa kiviaineksen eri tasoilta ja pohjakumista mitatuilla (vrt. luku 3.4.2) pysyvillä ja palautuvilla muodonmuutoksilla voitiin tukea siirtymäkäyttäytymisen arviointia. Kuvassa 6.2 on esitetty kuormituslevyn painuman sekä kyseisen levyn alla kiviaineksessa kahdella tasolla mitatun painuman kehittyminen esimerkikokeen 4 kuluessa. Pohjakumin pysyvä painuma todettiin kokeissa hyvin vähäiseksi, suurimmillaan voimakkaan hienonemisen kokeessa 4 kuuden miljoonan kuormitus-syklin jälkeenkin alle 1 mm suuriseksi. Tästä syystä kuvan 6.2 mukaisista tuloksista voidaan arvioida eri kiviaineksen painumista eri korkeustasoilla. Pysyvä painuma niin 12 cm kuin 24 cm korkeustasollakin materiaalin pohjalta lukien oli kokeissa melko vähäinen kuormituslevyjen kokonaispainumiin verrattuna, kuten myös kuvan 6.2 mukaisessa kokeen 4 esimerkissä nähdään. Havainnot olivat periaatteeltaan hyvin yhteneviä kaikissa kokeissa (1–9, 11), joissa painumia kiviaineksen eri tasoilla mitattiin. Näin ollen suurin osa kuormituslevyjen painumista oli seurausta kiviaineksen ylimmän

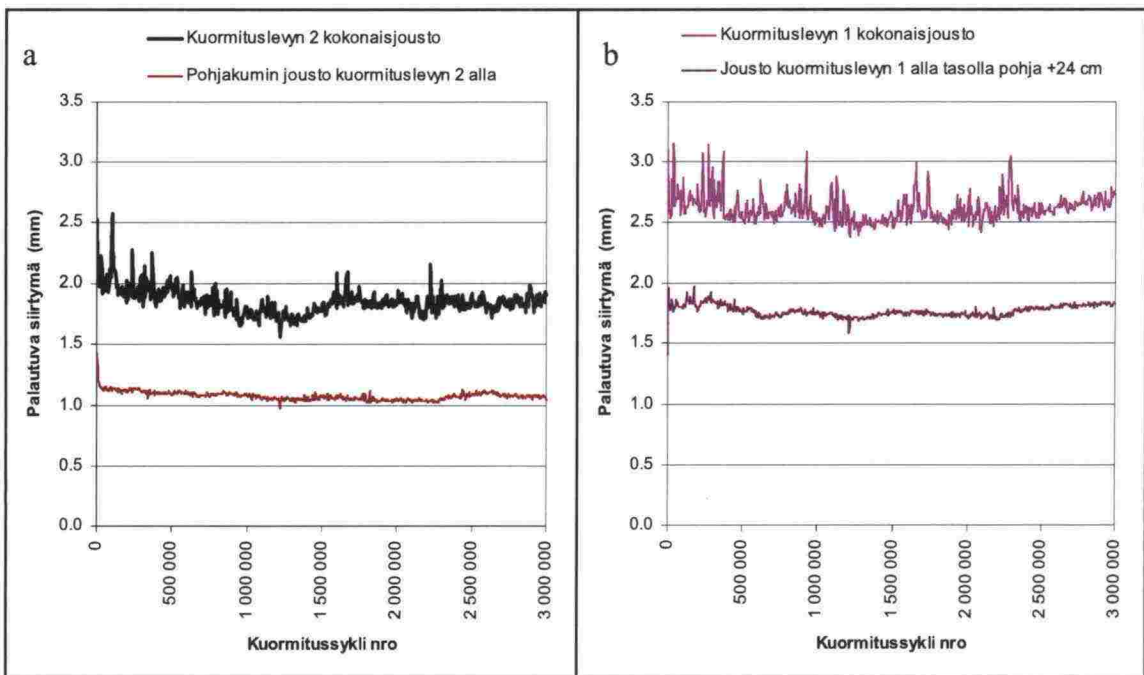
kolmanneksen uudelleenjärjestäytymisestä ja työntymisestä ylöspäin kuormituslevyjen väleihin.

Uudelleenjärjestäytymisen keskittyminen rakennekerroksen yläosiin on oletettavasti tilanne myös todellisessa radan kuormitustilanteessa, mutta kiviaineksen työntyminen kuormituslevyjen alta ylöspäin on radassa periaatteellisellakin tasolla mahdollista vain tukikerroksessa. Alemmissa rakennekerroksissa kiviaineksen merkittävä työntyminen ylöspäin on tukikerroksessa jakautuneen kuormituksen ansiosta kyseeseen tulevilla rakennemateriaaleilla ja toimivalla kuivatuksella epätodennäköistä. Näin ollen koejärjestely ei tässä suhteessa täysin vastaa todellista tilannetta välikerroksen pinnalla.



Kuva 6.2. Kuormituslevyn kokonaispainuma kokeessa 4 suhteessa levyn alta kiviaineksesta 12 cm pohjatason yläpuolelta (vas.) ja 24 cm pohjatason yläpuolelta (oik.) mitattuun painumaan. Kuvassa nähdään myös pohjakumin pysyvän painuman vähäisyys.

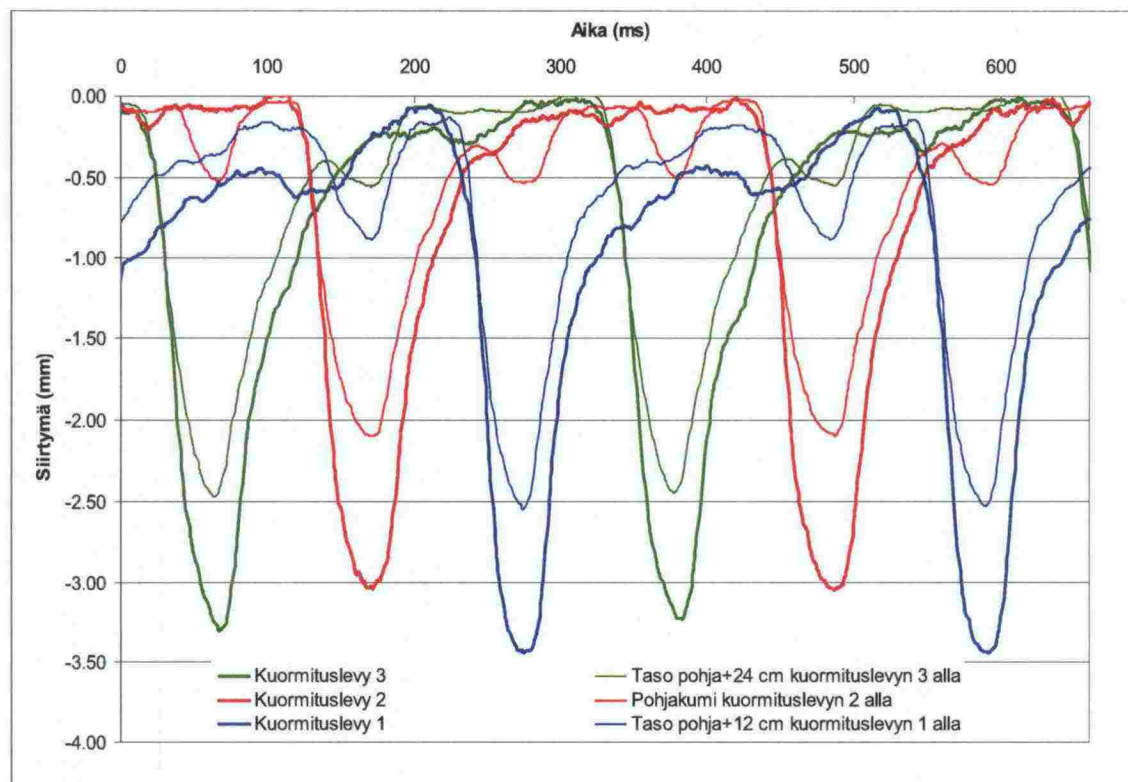
Edellä kuvatut kokeissa 1–9 ja 11 käytetyt siirtymämittausjärjestelyt mahdollistivat kuvassa 6.2 pysyville painumille esitetyn tarkastelun tekemisen myös palautuvien liikkeiden osalta. Kuvassa 6.3 nähdään esimerkkinä mittaustulokset kokeesta 11. Kyseisessä kokeessa keskimmäisen kuormituslevyn alapuolella pohjakumin kimmoinen jousto kuormituspulssin aikana oli 1.1 mm ja vastaavasti keskimmäisen kuormituslevyn keskimääräinen kokonaisjousto 1.9 mm. Tällöin kiviaineksen palautuvan muodonmuutoksen osuus kokonaisjoustosta oli noin 0.8 mm. Tarkastelluissa kokeissa 2–8, 10, 11, 14 ja 15 em. tavalla laskettu kiviaineksen jousto oli varsin samansuuruinen vaihdellen kokonaisjouston suuristakin eroista riippumatta ainoastaan välillä 0.7–1.1 mm.



Kuva 6.3. Kuormituspulssin välillä kokeessa 11 mitatut palautuvat joustot. Vasemmalla keskimmäisen kuormituslevyn kokonaisjousto ja sen alta mitattu pohjakumin jousto. Oikealla reunimmaisen kuormituslevyn kokonaisjousto sekä sen alta 24 cm pohjatason yläpuolelta mitattu jousto.

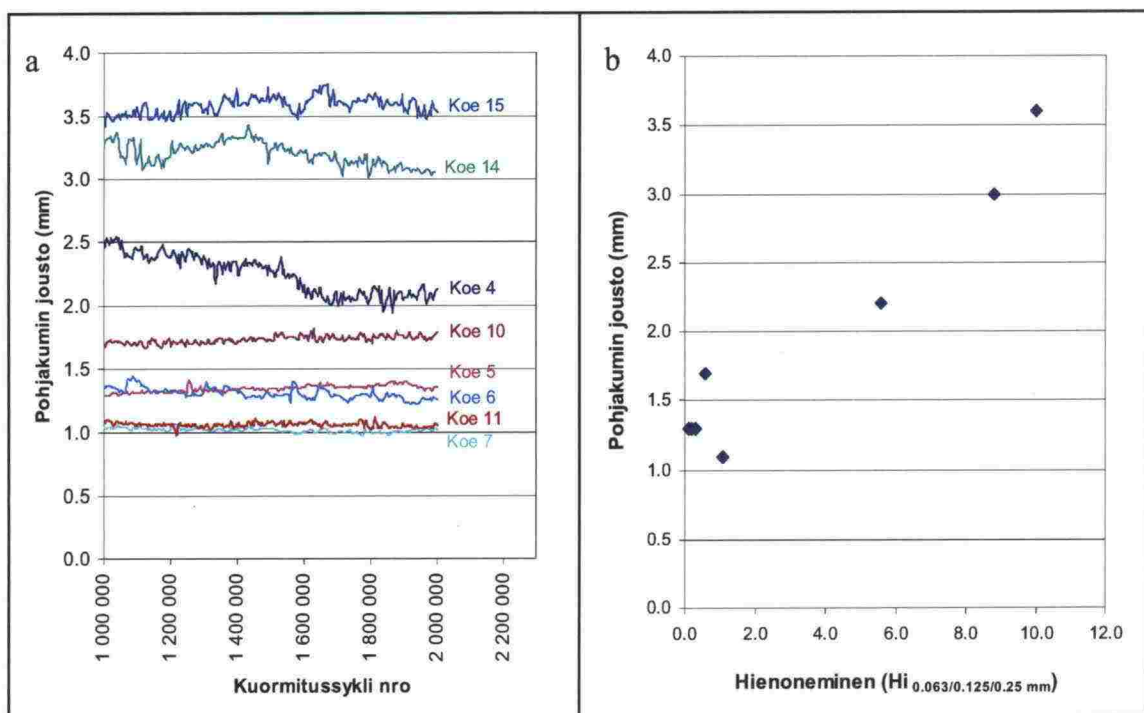
Kuten aiemmin todettua, keskimmäisen kuormituslevyn palautuva liike oli koeteknisistä rajoitteista johtuen keskimäärin noin 20 % pienempi reunimmaisten kuormituslevyjen liikkeeseen verrattuna. Eron pääteltiin muodostuvan pääosin pohjakumin joustoerosta. Tarkasteltaessa kuvaa 3.11 koestuslaatikosta havaitaan, että reunimmaisten kuormituslevyjen alla pohjakumiin kohdistuvan kuormituksen ei ole mahdollista jakaantua laatikon päädyn puoleisiin suuntiin. Tästä johtuen reunimmaisista kuormituslevyjä kuormitettaessa kuormitus kohdistuu pohjakumiin pienemmälle alalle kuin keskimmäistä kuormituslevyä kuormitettaessa. Tällöin kumiin aiheutuu reunimmaisten levyjen kuormituksesta suurempi palautuva jousto. Tulkintaa tukee se, että kaikissa tarkastelluissa kokeissa reunimmaisen kuormituslevyn kokonaisjouston ja levyn alapuolelta tasolta pohja+24 cm mitatun jouston erotus oli samaa suuruusluokkaa (0.5–1.0 mm) kuin keskimmäisen kuormituslevyn alta koko kiviainekselle laskettu jousto (esim. kuva 6.3). Näin oli huolimatta reunimmaisten kuormituslevyjen hyvinkin suurista kokonaisjoustoista joissakin kokeissa. Siten kiviaineksen sisäinen palautuva liike tapahtuu hyvin suurelta osin materiaalin ylimmässä kolmanneksessa. Havaintoa tukee myös reunimmaisen kuormituslevyn alta tasolta pohja+12 cm tehdyt siirtymämittaukset.

Siirtymäkäyttäytymistä havainnollistaa kuvassa 6.4 esitetty esimerkkijakso jatkuvan siirtymämittauksen tuloksista kokeessa 4. Tarkastelussa on kahden kuormituskyklin pituinen, noin 660 ms jakso, jossa kukin kuormituslevy kuormittaa kiviainesta vuorollaan 2 kertaa. Kuormituslevyjen alapuolelta eri tasoilta mitatut siirtymäkäyrät mukailevat muodoltaan kuormituslevyjen siirtymäkäyriä viestien mittausten luotettavuudesta.



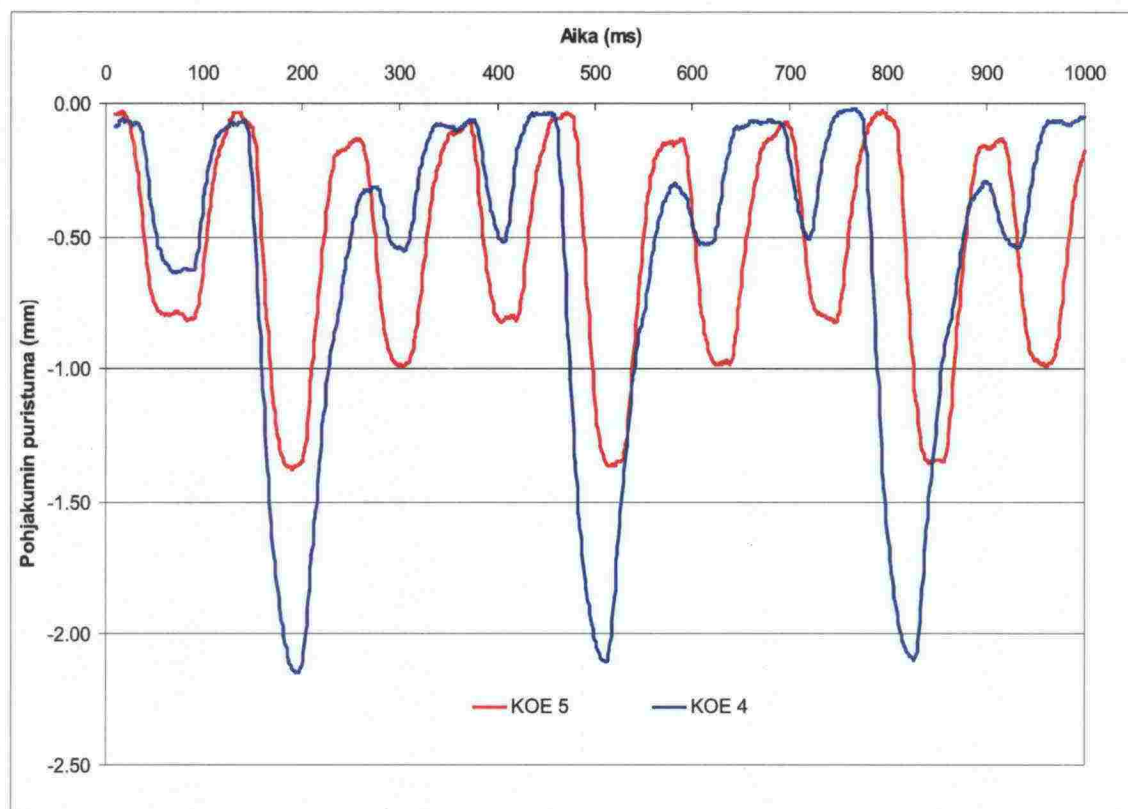
Kuva 6.4. Kahden kuormitussyklin mittainen esimerkki jatkuvan siirtymämittauksen tuloksista kokeessa 4.

Pohjan jouston osuus keskimmäisen kuormituslevyn kokonaisjoustosta vaihteli tarkastelluissa kokeissa 2–8, 10, 11, 14 ja 15 välillä 60–80 %. Keskimääräinen osuus kokeissa oli 65 %. Tietyn paksuisella pohjakumilla ja tietyllä kuormitustasolla eri kokeissa syntyvät joustoerot viestivät eroavaisuuksista kiviaineksen kyvyssä jakaa kuormituksia. Esimerkiksi vedellä kyllästetyssä tilassa hienorakeista ainesta sisältävälle kiviainekselle tehdyissä kokeissa 14 ja 15 pohjakumin jousto muodostui yli kaksinkertaiseksi tavanomaisiin kuivakokeisiin verrattuna, vaikka kuormitustaso ja pohjakumin paksuus olivat kokeissa samansuuruisia (kuva 6.5a). Voimakas pohjakumin jousto viestii kuormituksen heikosta jakautumisesta kiviaineksessa ja selkeiden pystysuorien liukumavyöhykkeiden muodostumisesta kiviainekseen kuormituslevyjen väleissä. Tällöin kuormittavan levyn alapuolella kuormitus kiviaineksesta pohjakumiin kohdistuu pahimmillaan ainoastaan välittömästi kuormituslevyn alla olevalle osalle pohjakumia aiheuttaen kumin suuren kimmoisen painuman. Liukumavyöhykkeessä partikkelit hioutuvat ja iskeytyvät voimakkaasti toisiaan vasten, mikä johtaa miljoonien kuormitussykliä seurauksena kiviaineksen merkittävään hienonemiseen. Tulos on nähtävissä voimakkaimmin hienontuneissa kokeissa 4, 14 ja 15, joissa kaikissa myös pohjakumin jousto oli poikkeuksellisen suurta. Kuormitustasoltaan ja pohjakumi-paksuudeltaan vertailukelpoisissa kokeissa, joissa pohjakumin jousto mitattiin (kokeet 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14 ja 15) pohjakumin jouston suuruus korreloi erinomaisesti hienorakeisten kiviaineslajitteiden hienonemiseen (kuva 6.5b).



Kuva 6.5. Keskimmäisen kuormituslevyn alla tapahtuvan pohjakumin jouston suuruus välillä 1.0–2.0 miljoonaa pulssia (vas.) ja pohjakumin jouston yhteys hienorakeisten kiviaineslajitteiden hienonemiseen (oik.). Tarkastelussa ovat mukana kokeet, joissa pohjakumipaksuus ja kuormitustaso olivat vertailukelpoisia ja pohjakumin joustoa mitattiin, eli kokeet 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14 ja 15.

Kuormituksen jakaantumista kiviaineksessa tarkasteltiin siirtymämittauksista myös yksittäisten kuormituspulssien aiheuttamien siirtymien perusteella. Kuvassa 6.6 on vertailtu pohjakumin kokoonpuristumaa yhden sekunnin aikavälillä kokeissa 4 ja 5. Kokeessa 4 kiviaines hienontui voimakkaasti ja pohjakumi jousto oli suuri, kun vastaavasti kokeessa 5 kiviaines ei käytännössä hienontunut ja pohjakumin jousto oli selvästi pienempi, kuten myös kuvasta 6.6 nähdään. Oleellisempi huomio kuvasta 6.6 on kuitenkin se, miten pohjakumi joustaa keskimmäisen kuormituslevyn alapuolella silloin, kun kuormitus kohdistetaan viereisiin kuormituslevyihin. Kokeessa 5 kumi painuu reunimmaisista levyistä kuormitettaessa keskimmäisen kuormituslevyn alapuolella huomattavasti enemmän kuin kokeessa 4. Tämä ilmentää kuormituksen huomattavasti parempaa jakautumista kokeen 5 kiviaineksessa. Kokeessa 5 reunimmaisten kuormituslevyjen kuormittamisen aiheuttama painuma kumissa keskimmäisen levyn alapuolella on noin 70 % siitä puristumasta, jonka kumi joustaa suoraan yläpuolelta kuormitettaessa. Kokeessa 5 vastaava osuus on alle neljännes, jolloin seurauksena on kiviainesta hienontavien liukumavyöhykkeiden muodostuminen edellä kuvatulla tavalla. Kokeissa 14 ja 15 käyttäytyminen oli periaatteeltaan kokeen 4 tilannetta vastaavaa ja vastaavasti kokeen 5 mukaista muissa tarkastelluissa kokeissa, joissa hienoneminen oli olematonta.



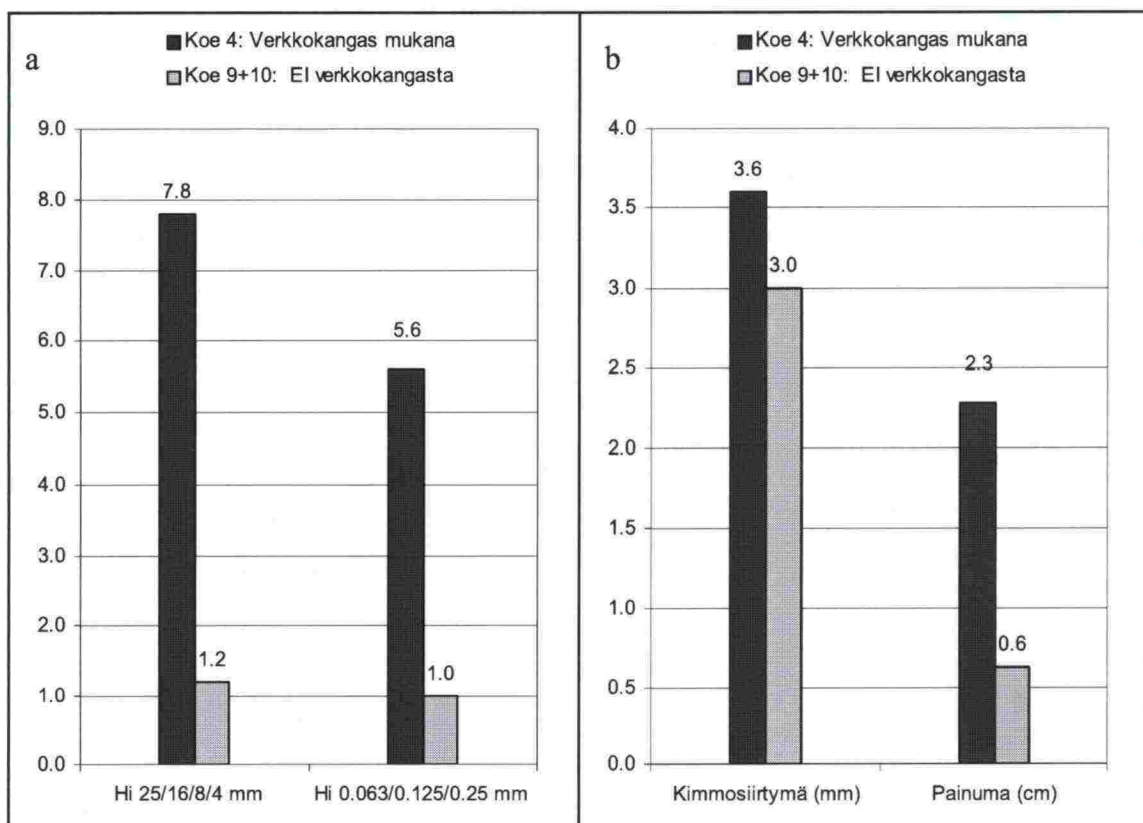
Kuva 6.6. Kuormituspulssien aiheuttama pohjakumin kimmainen kokoonpuristuma keskimmäisen kuormituslevyn alapuolella yhden sekunnin ajanjaksolla kokeissa 4 ja 5. Keskimmäisen kuormituslevyn kuormitushetket ilmenevät suurimpina puristumina ajanhetkillä 200, 520 ja 850 ms. Pienemmät puristumakäyrien notkahdukset ovat seurausta reunimmaisten kuormituslevyjen iskuista.

Seuraavissa luvuissa 6.2–6.7 lähestytään toistokuormituskokeiden tuloksia arvioiden erikseen kunkin tarkastellun muuttujan vaikutuksia kokeissa havaittuun hienonemiseen ja muodonmuutoskäyttäytymiseen.

6.2 Koetekniset havainnot

6.2.1 Hienonemisen taustalla olevat tapahtumat ja verkkokankaan vaikutus

Kokeissa pyrittiin alun perin tarkastelemaan erikseen kiviaineksen hienonemista koestuslaatikon eri osissa jakamalla kiviaines verkkokangasta käyttäen materiaalin sekoittumisen estäviin osioihin (vrt. kuva 3.17b). Verkkokankaan havaittiin kuitenkin vääristävän kiviaineksen toimintaa dramaattisella tavalla. Kokeessa 4 verkkokangas asennettiin pystysuorille tasoille kuormituslevyjen väliin. Koe tehtiin Lakalaivan kiviainekselle 4/32 mm rakeisuudella. Kuormitustaso kokeessa oli 225 kPa ja 0.5 mm peltilevyllä pinnoitetun pohjakumin paksuus 50 mm. Kiviaines hienoni kokeessa erittäin voimakkaasti. Karkeiden rakeiden hienonemisindeksiksi ($Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}}$) muodostui 7.8 ja hienorakeisten lajitteiden hienonemisindeksiksi ($Hi_{0.063/0.125/0.25 \text{ mm}}$) peräti 5.6 (kuva 6.7). Ilman verkkokangasta tehtyjen, muutoin täysin vastaavien kokeiden 9 ja 10 keskiarvona $Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}}$ oli 1.2 ja $Hi_{0.063/0.125/0.25 \text{ mm}}$ vastaavasti 1.0. Myös kuormituslevyjen painuma oli kokeessa 4 selvästi suurempi kuin kokeissa 9 ja 10.



Kuva 6.7. Verkkokankaan vaikutus hienonemisindeksiin (vas.) sekä kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin ja pysyviin painumiin (oik.) kokeessa 4 ja kokeiden 9 ja 10 keskiarvona määritettyyn tulokseen.

Verkkokankaan dramaattisesta vaikutuksesta varmistumiseksi tarkasteltiin tilannetta vielä toisella kiviaineksella (km 50+700) ja lyhennetyssä kokeessa. Kokeessa 19 käytettiin verkkokangasta ja koe 7 tehtiin muilta osin vastaavana, mutta ilman verkkokangasta. Koeteknisen ongelman vuoksi kokeen 7 kiviaineksen hienonemista ei voitu seulonnallisesti määrittää, mutta silmämääräisesti arvioiden hienoneminen oli erittäin vähäistä ja hienonemisindeksit hyvin todennäköisesti alle 1.0. Kokeessa 19 $Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}}$ oli 6.6 ja $Hi_{0.063/0.125/0.25 \text{ mm}}$ vastaavasti 3.3.

Verkkokankaan aiheuttama dramaattinen vaikutus oli seurausta kangasta mukailevien liukumavyöhykkeiden muodostumisesta kiviainekseen. Kangas oli riittävä tekijä helpottamaan partikkelien välistä liikettä voimakkaan hienonemisen alkamiseksi. Partikkelien liukuessa toistensa suhteen ne iskeytyivät ja hioutuivat toisiaan vasten. Kokeen edetessä hienonemisvyöhyke laajeni kankaan lähiympäristöön, mutta suoraan kuormituslevyjen alapuolisella alueella hienoneminen oli huomattavan vähäistä, kuten kuvan 6.8 esimerkissä kokeesta 26. Kuvattua päätelmää tukee edellisessä luvussa esitetyt siirtymämittaushavainnot ja niiden perusteella tehdyt päätelmät kuormituksen jakaantumisesta (esim. kuva 6.6). Todellista ratarakenteen kuormitustilannetta ajatellen positiivinen havainto oli se, että merkittävän liukupinnan muodostuminen edellytti näissä koeolosuhteissa verkkokankaan mukanaoloa, eikä pahin tilanne toteutunut ilman verkkokangasta kokeissa 9, 10 tai 7.

On todettava, että havainto verkkokankaan määräävästä vaikutuksesta oli hyvin yllättävä. Samalla havainto kuitenkin selkeytti merkittävästi dramaattisen hienonemistapahtuman perusilmiötä, joka oli vastaava myös niissä ilman verkkokangasta tehdyissä kokeissa, joissa hienoneminen oli merkittävää. Tästä tyypillisenä esimerkkinä kuvassa 6.8 nähdään tilanne kokeesta 26, jossa tapahtui voimakasta hienonemista. Kokeen jälkeen materiaalin pinnalta oli nähtävissä rakeiden pyöristymisen kuormituslevyjen välisissä liukumavyöhykkeissä (kuva 6.8a). Alempana kiviaineksessa hienonemisen voitiin selvästi havaita tapahtuneen pääosin liukumavyöhykkeessä sekä rajapintaongelmasta johtuen (vrt. luku 6.2.4) laatikon reunojen läheisyydessä (kuva 6.8b).

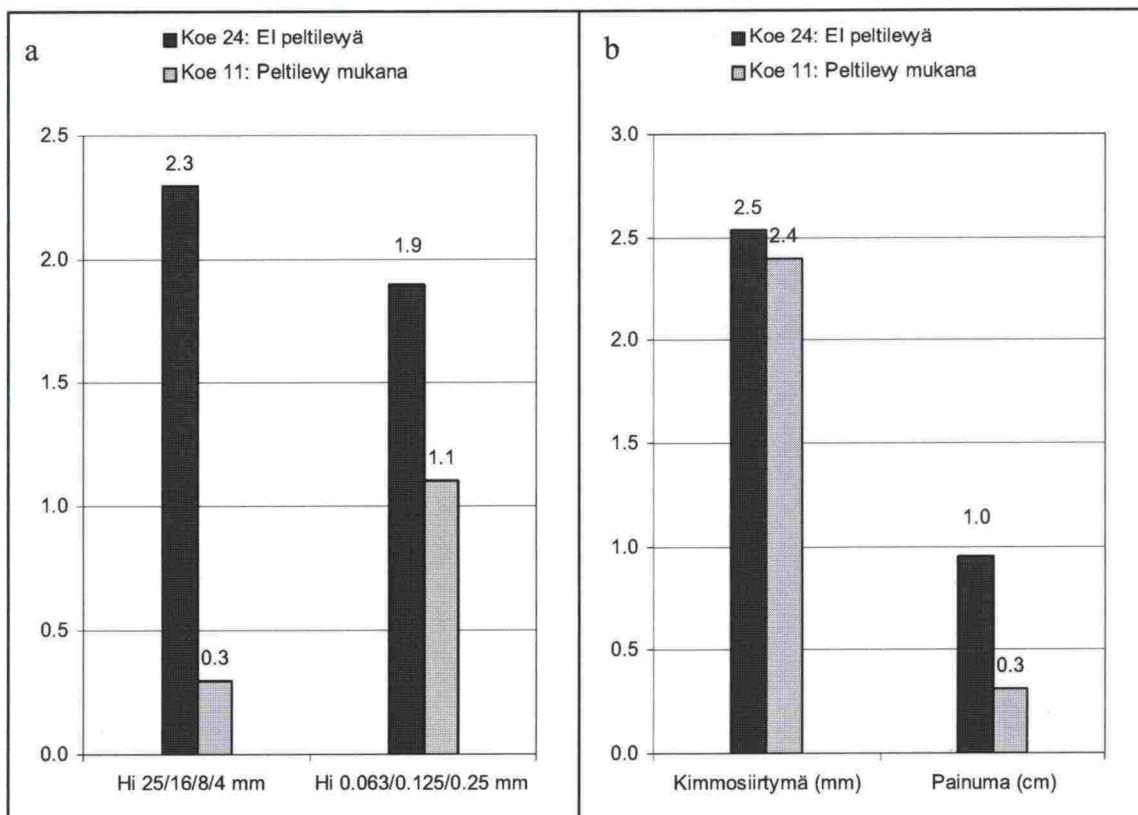


Kuva 6.8. Selvät hienonemisvyöhykkeet kuormituslevyjen välissä esimerkkinä kokeesta 26. Tussi sijaitsee keskimmäisen kuormituslevyn kohdalla. Kiviaineksen pinnalta otetussa kuvassa (ylh.) nähdään karkeiden rakeiden pyöristymisen hienonemisvyöhykkeissä. Alempaa otetussa kuvassa (alh.) on nähtävissä selvät hienonemiskaistat kuormituslevyjen välisillä alueilla.

6.2.2 Peltilevy pohjakumin päällä

Pohjan sienikumikerroksen päälle asennetulla 0.5 mm peltilevyllä oli selvä vaikutus kiviaineksen hienonemiseen. Peltilevyä käytettiin kokeissa 1–22 tarkoituksena estää yksittäisten kiviainesrakeiden voimakas tunkeutuminen pohjakumiin jakamalla kumiin kohdistuvaa kuormitusta hieman tasaisemmin. Kokeissa 23–35 peltilevyä ei käytetty, vaan kiviaines asennettiin suoraan kumikerroksen päälle.

Peltilevyn vaikutusta voidaan tarkastella kahdessa eri tapauksessa kokeista 24 ja 11 sekä toisaalta kokeista 26 ja 7. Peltilevyä lukuun ottamatta keskenään vastaavissa kokeissa 24 ja 11 kiviaineksena oli melko laajan raekokajakautuman (0/40 mm) omaava materiaali, joka hienontui hyvin vähän peltilevyä käyttäen tehdyssä kokeessa 11. Ilman peltilevyä tehdyssä kokeessa 24 hienonemista tapahtui selvästi (kuva 6.9). Kokeiden 26 ja 7 välillä ero oli samansuuntainen, mutta selvästi suurempi, mikä johtui hienonemiselle alttiimman raekokajakautuman (4/32 mm) käyttämisestä. Peltilevyn poisotto lisäsi siis hienonemista selvästi, jolloin erot eri kokeissa tapahtuneissa kiviainesten hienonemisissa tulivat paremmin esiin. On huomattava, että hienonemisero ei selity kokonaisjouston lisääntymisellä, sillä kuormituslevyjen jousto ei kasvanut peltilevyn poisoton myötä. Ilman peltilevyä tehty koejärjestely mahdollisti eri muuttujien vaikutuksen tarkastelun myös olosuhteissa, joissa aiemmin peltilevyä käytettäessä hienonemista ei ollut lainkaan tapahtunut.



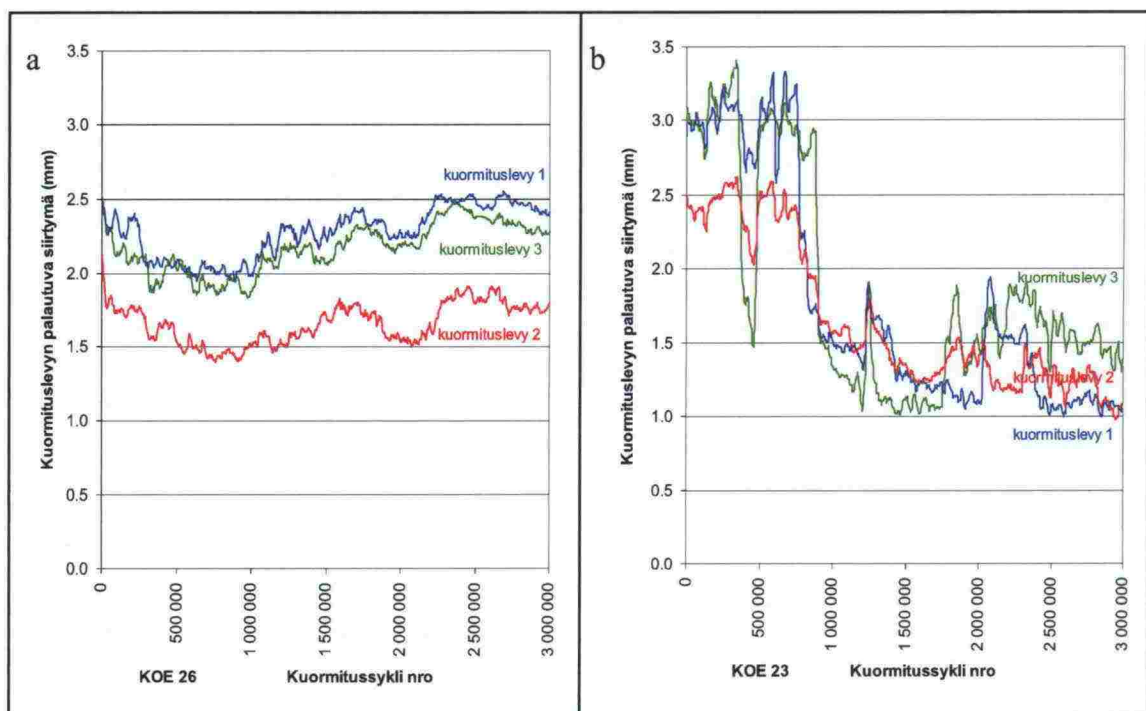
Kuva 6.9. Peltilevyn vaikutus hienonemisindekseihin (vas.) sekä kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin ja pysyviin painumiin (oik.) kokeissa 11 ja 24. Kokeiden 7 ja 26 välillä hienonemisero oli vielä merkittävämpi.

Vaikea kysymys on se, kumpi tilanne kuvaa paremmin todellista pohjamaata. Tätä arvioitaessa on huomattava, että peltilevyn poisotto hieman yllättäen ei lisännyt kuormituslevyjen kokonaisjoustoja (esim. kuva 6.9b). Näin ollen ero tilanteiden välillä muodostui todennäköisesti lähinnä siitä, että suurimpia jännityksiä välittävien partikkeliketjujen rakeiden oli ilman peltilevyä mahdollista tunkeutua kumiin. Tämän seurauksena kumiin selvästi ja vähemmän painautuvien partikkeliketjujen rakeiden välille oli mahdollista syntyä peltilevytapaukseen verrattuna enemmän kiviainesta kuluttavaa liikettä. Vastaus todellisen pohjamaan käyttäytymisen kuvaavuudesta riippuu luonnollisesti osaksi myös pohjamaasta. Todelliseen ratarakenneympäristöön suoraan sovellettavia absoluuttisia lukuarvoja hienonemistulokset eivät ole kummassakaan tapauksessa. Peltilevyn poisottamisesta johtuen kokeet 23:sta eteenpäin sopivat kuitenkin vertailtaviksi vain keskenään, eivät aiempien kokeiden kanssa.

6.2.3 Kuormituslevyjen sitomiskorjaukset

Kuormituslevyjen hallitsemattomien liikkeiden estämiseksi käytettiin kahta vaihtoehtoa luvussa 3.4.1 esitettyä korjauksia (esim. kuvat 3.14). Ohjurimäntä-holkkikorjauksia käytettiin kokeissa 4–6 ja 20–23. Muissa kokeissa käytettiin sidelattakorjauksia. Ohjurimäntien ja -holkkien osalta ongelmaksi muodostui niiden välillä voitelusta huolimatta vaikuttanut kitka, jonka suuruutta oli vaikea arvioida. Kitka pienensi todellista kiviainekseen kohdistuvaa kuormitusta ja aiheutti epävarmuuden sen suuruudessa. Koska kitkan suuruus oletettavasti riippui vielä tapauskohtaisesti kiviaineksen painumisen epätasaisuudesta, ohjurimäntiä käyttäen tehtyjä kokeita ei huomioitu eri muuttujien vaikutusten arvioinnissa.

Esimerkkitalanteena ohjurimäntien kuormitusta pienentävää vaikutusta voidaan verrata kokeiden 23 ja 26 tuloksista. Kokeet olivat muilta osin keskenään vastaavat, mutta koe 23 tehtiin ohjurimäntäkorjauksella ja koe 26 tavanomaisilla sidelatoilla. Kuvassa 6.10 on esitetty kuormituslevyjen palautuvat siirtymät kokeiden kuluessa. Kuvasta nähdään, että kokeessa 26 siirtymät vaihtelivat kokeen kuluessa verraten vähän. Kokeessa 23 vaihtelu oli sitä vastoin suurta ja palautuvien siirtymien trendi oli kokeen edetessä pienenevä. Vaihtelut ja siirtymien pienenevä suuntaus viestivät kitkan esiintymisestä ja sen lisääntymisestä kokeen edetessä epätasaisien painumien pyrkiessä kallistamaan kuormituslevyjä ja niihin kiinnitettyjä ohjurimäntiä. Alentuneesta todellisesta kuormitustasosta johtuen luonnollisesti myös hienoneminen oli ohjurimäntäkokeessa 23 vähäisempää kuin sidelatoilla tehdyssä kokeessa 26.



Kuva 6.10. Kuormituslevyjen palautuvat siirtymät sidelatoilla tehdyssä kokeessa 26 (vas.) ja ohjuri-männillä tehdyssä kokeessa 23 (oik.).

6.2.4 Laatikon reuna-alueet

Todellisen ratarakenteen kuormitus tilanteen simuloimiseksi suurin yksittäinen ongelma oli tutkittavan kiviaineksen rajapintojen toiminnan saaminen todellista tilannetta mukailevaksi. Tässä ei täysin onnistuttu, mistä johtuen kokeissa havaittuja hienonemistuloksia ei missään nimessä voida soveltaa absoluuttisina arvoina ratarakenteen tilanteeseen. Edellä luvussa 6.2.2 käsiteltiin pohjan joustokumin päälle asennetun peltilevyn huomattavaa vaikutusta hienonemiseen. Ongelmallisin ja lopultakin ilman ratkaisua jäänyt seikka oli kuitenkin kiviaineksen hioutuminen laatikon seinämiä vasten. Vaikka peltilevyllä pinnoitettua sienikumia käyttämällä (vrt. luku 3.4.1) ongelmaa pystyttiin jossain määrin pienentämään, laatikon reunojen läheisyydessä havaittu hienoneminen oli poikkeuksetta muuhun materiaaliin nähden voimakkaampaa (kuvat 6.11 ja 6.8b) ja täten todellisessa rakenteessa tapahtuvaa hienonemista vääristävää. Pahin tilanne oli laatikon alaosissa. Kokeissa 1–19 käytetystä joustokumista luovuttiin laatikon pitkällä sivuilla kokeissa 20–35 (vrt. taulukko 6.1).

Kehitetty kuormitusjärjestely oli täten eri muuttujien vaikutusten vertailun mahdollistava mallikoe, jossa oli todelliseen kuormitus tilanteeseen nähden selviä puutteita. Ongelmien täydellinen ratkaisu laboratoriomittakaavan järjestelyillä edellyttäisi kuitenkin huomattavaa lisäpanostusta laitteiston kehittelyyn ja käytännössä koemittakaavan merkittävää kasvattamista entisestään. Kehitystyössä voitaisiin soveltaa Indraratnan ja Salimin (2003) esittämää horisontaalisuunnassa liikkuvien seinämien voimaohjausta.



Kuva 6.11. Kiviaineksen hioutuminen laatikon reunoja vasten oli suurin todellisessa kuormitustilanteessa tapahtuvaa hienonemista vääristänyt ongelma.

6.2.5 Hienoneminen tärytystiivistyksessä

Tiivistystyön, kiviaineksen käsittelyn ja seulonnan vaikutusta hienonemiseen tutkittiin yksittäisessä Lakalaivan kiviainekselle raekokojakautumalla 4/32 mm tehdyssä testissä. Kiviaines tiivistettiin kokeissa käytetyllä (ks. luku 3.4.1) menetelmällä koestuslaatikkoon, jonka pituusmitta oli pienennetty seulontatyön vähentämiseksi kolmannekseen alkuperäisestä. Tiivistyksen ja käsittelyn hienontava vaikutus havaittiin melko pieneksi. Karkeiden rakeiden hienonemisindeksiksi ($Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}}$) saatiin 0.5 ja hienorakeisten lajitteiden indeksiksi ($Hi_{0.063/0.125/0.25 \text{ mm}}$) vastaavasti 0.1. Hienorakeista ainesta sisältävissä kiviaineksissa etenkin hienorakeisten lajitteiden indeksi olisi todennäköisesti ollut jonkin verran suurempi.

6.3 Pohjan joustavuuden ja kuormitustason vaikutus

Pohjamaan joustavan käyttäytymisen simuloimiseksi käytetyn pohjakumin jousto pyrittiin perustapauksissa lähtökohtaisesti järjestämään suuruusluokaltaan runsaan 1 mm tasolle. Testien perusteella tähän päädyttiin normaalitilanteessa, kuten kuvan 6.3 esimerkissä tarkastellussa kokeessa 11, 50 mm sienikumipaksuudella, joka siten valittiin perustapaukseksi kokeissa. Kumipaksuutta varioitiin yksittäisissä kokeissa, kun pyrittiin arvioimaan pohjan jouston vaikutusta kiviaineksen hienonemiseen. Tätä vaikutusta voidaan tarkastella vertaamalla kokeiden 8 ja 12 sekä toisaalta kokeiden 26 ja 27 tuloksia.

Kokeissa 8 ja 12 kiviaineksena oli km 50+700 raekokojakautumalla 8/40 mm, kuormitustasona 225 kPa (vrt. taulukko 6.1) ja ainoana erona kokeiden välillä oli pohjakumin paksuus. Kokeessa 8 pohjan sienikumipaksuus oli 50 mm ja kokeessa 12 vastaavasti 100 mm. Pohjakumien päällä oli 0.5 mm peltilevy. Kuormituspulssien välillä palautuva pohjakumin puristuma oli keskimmäisen kuormituslevyn alla kokeessa

8 keskimäärin 1.3 mm ja kokeessa 12 vastaavasti 2.2 mm. Ero oli nähtävissä saman-suuruisena kuormituspulssin aikana palautuvissa kuormituslevyjen keskimääräisissä liikkeissä (2.6 mm vs. 3.6 mm). Vaikka palautuva jousto oli paksumpaa kumia käytettäessä suurempi, kuormituksen jakaantuminen kiviaineksessa oli hyvä myös tässä tapauksessa. Havainto ilmeni luvussa 6.1.3 esitetyn (vrt. kuva 6.6) mukaisessa pohjakumin jouston tarkastelussa. Keskimmäisen kuormituslevyn alapuolelta määritetty kumin jousto oli viereisiä kuormituslevyjä kuormitettaessa miltei 70 % siitä puristumasta, jonka kumi jousti suoraan yläpuolelta kuormitettaessa vastaavalla tavalla, kuten kokeessa 5 kuvassa 6.6. Tämä selitti sitä, miksi kiviaines ei kuormituksen vaikutuksesta hienontunut kummassakaan kokeessa lainkaan. Havaittu hyvin vähäinen hienoneminen vastasi luvussa 6.2.5 kuvattua kiviaineksen tiivistyksessä ja käsittelyssä tapahtuvaa hienonemista. Myös kuormituslevyjen pysyvät painumat oli molemmissa kokeissa erittäin vähäistä, eikä pohjan joustosta aiheutuvia eroja täten voitu havaita.

Myös kokeiden 26 ja 27 välillä ainoa muuttuja oli pohjan sienikumin paksuus. Kokeet tehtiin kiviainekselle km 50+700 rakeisuudella 4/32 mm ja 225 kPa kuormitustasolla (vrt. taulukko 6.1). Pohjakumin paksuus kokeessa 26 oli 50 mm ja kokeessa 27 vain 10 mm. Pohjakumin päällä ei ollut peltilevyä, vaan kiviaines asennettiin suoraan kumilevyn päälle. Kuormituslevyjen keskimääräinen palautuva liike kokeen aikana oli 10 mm kumilla 1.5 mm ja 50 mm kumilla 2.1 mm. Pohjan joustavuuden vaikutus kiviaineksen hienonemiseen oli erittäin huomattava, sillä 50 mm pohjakumin vaikutuksesta hienoneminen lisääntyi tunnusluvusta riippuen kolmin- nelinkertaiseksi verrattuna kokeeseen 10 mm pohjakumilla (kuva 6.12). Myös kuormituslevyjen keskimääräinen pysyvä painuma välillä 0.5–3.0 miljoonaa sykliä lisääntyi 16.9 mm:stä 23.7 mm:iin. Kumipaksuuden vaikutus hienonemiseen oli siten huomattavasti suurempi kuin vaikutus palautuvan liikkeen tai pysyvän painuman suuruuteen.

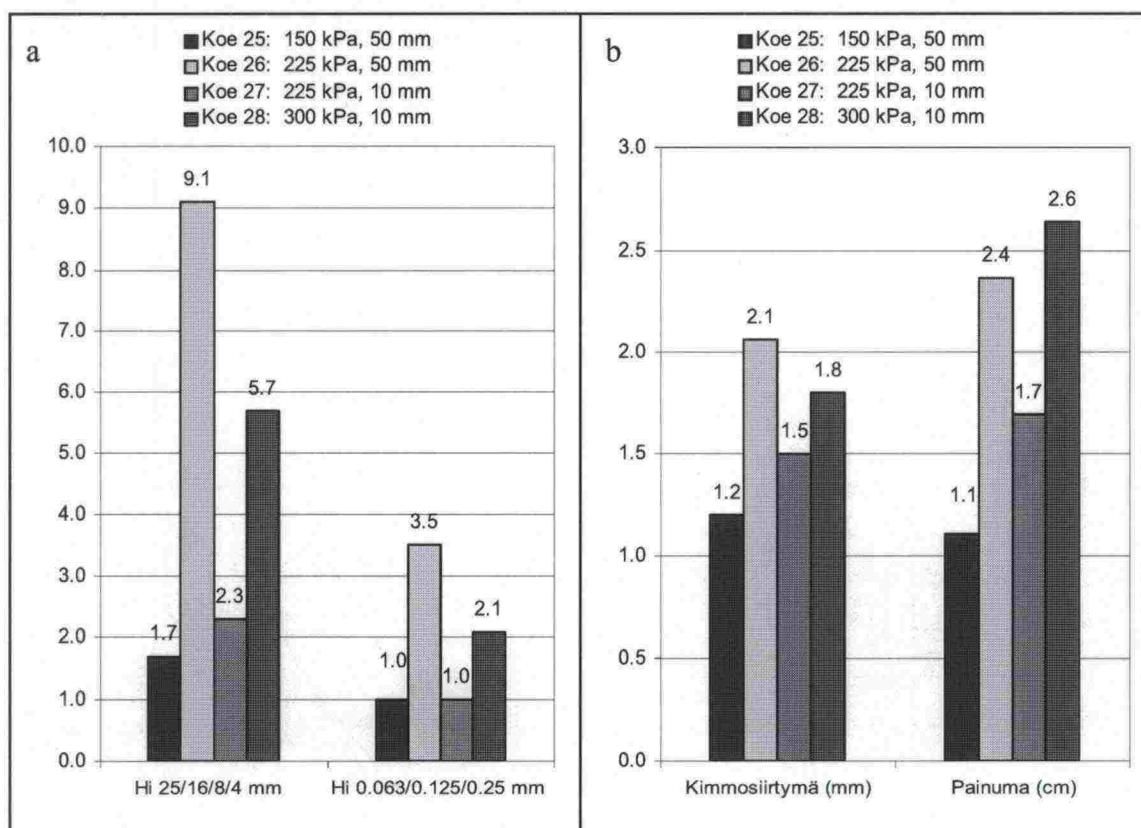
Pohjamaan joustavuuden vaikutuksia arvioitaessa tulee huomioida myös jouston vaikutus rakennekerroksiin kohdistuvan kuormitustason suuruuteen. Pohjamaan jouston pienentyessä myös kiskon taipuma pienenee ja siten kuormitus ei jakaudu yhtä usealle ratapölkylle, vaan välittyy tukikerrokseen suuremmalta osin välittömästi pyörän alapuolisesta ratapölkystä. Näin ollen pohjamaan jäykkyyden lisääntyessä rakennekerroksiin kohdistuvat kuormitustasot kasvavat. Rakennemateriaaleihin kohdistuvaa kuormitustasoa ja sen vaikutuksia tuleekin ajatella akselipainon ohella myös pohjamaan joustavuudesta riippuvana tekijänä. Kokeissa käytettyjen kuormitustasojen valintaa ja vastaavuutta junan akselikuormiin on tarkasteltu luvussa 3.4.1 sekä aiemmassa julkaisussa (Nurmikolu, 2004).

Kokeissa 25 ja 26 verrattiin kuormitustason vaikutusta km 50+700 kiviaineksella rakeisuudella 4/32 mm, kun pohjan joustokumipaksuus oli 50 mm. Pohjakumin päällä ei ollut peltilevyä. Kuormitustason korottaminen 150 kPa:sta (koe 25) 225 kPa:iin (koe 26) lisäsi hienonemista ratkaisevasti. Erityisesti karkeiden rakeiden hienonemisindeksi viisinkertaistui (kuva 6.12). Kaikkein hienorakeisimman aineksen syntyä kuvaava indeksi kasvoi 3.5-kertaiseksi. Kuormituslevyjen painuma kaksinkertaistui ja myös kuormituslevyjen palautuva liike kasvoi kuormituksen lisäämistä suuremmassa suhteessa. Pienemmällä kuormitustasolla hienoneminen oli kaikkiaan varsin vähäistä.

Kokeissa 27 ja 28 testattiin samaa kiviainesta kuin kokeissa 25 ja 26, mutta pohja oli jäykempi joustokumin paksuuden ollessa 10 mm. Kuormitustaso kokeessa 27 oli

225 kPa ja kokeessa 28 vastaavasti 300 kPa. Kuormitustason lisäyksen vaikutuksesta hienonemista kuvaavat indeksit noin kaksinkertaistuivat ja kuormituslevyjen painuma lisääntyi 1.5-kertaiseksi.

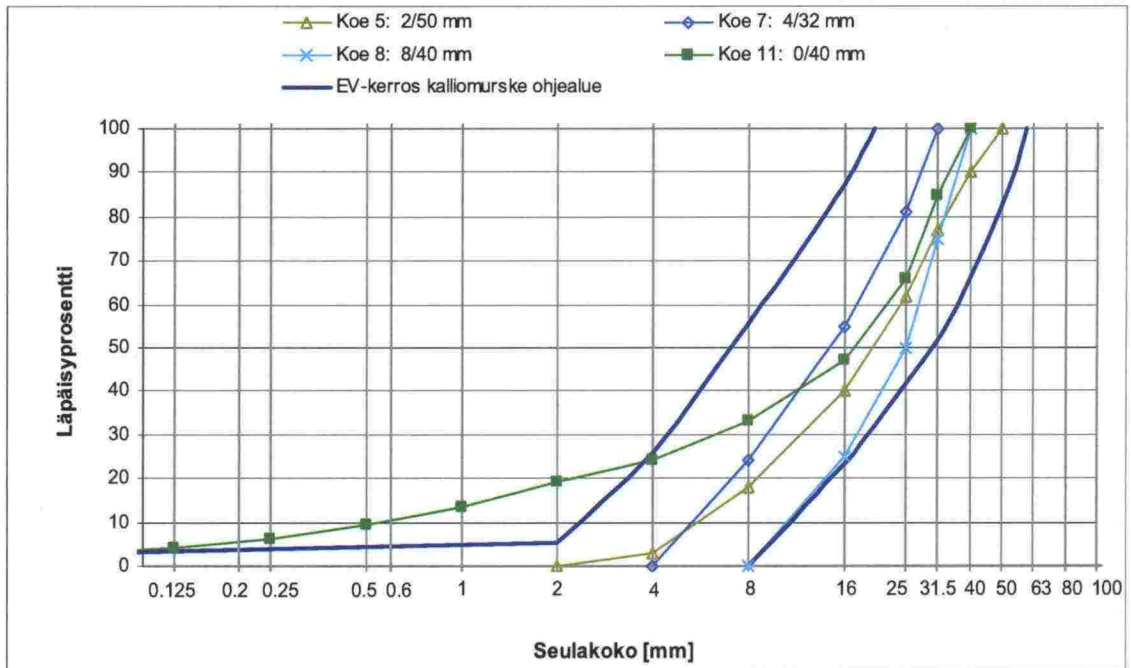
Tuloksista on mielenkiintoista havaita, että kuormitustason alentaminen 225 kPa:sta 150 kPa:iin vähensi hienonemista 50 mm pohjakumia käytettäessä yhtä paljon kuin pohjakumin ohentaminen 50 mm:stä 10 mm:iin. Toisaalta perustapaukseen (225 kPa, 50 mm, koe 26) verrattuna kuormitustason korottaminen 300 kPa:iin ja pohjakumin samanaikainen ohentaminen 10 mm:iin (koe 28) aikaansai melko selvän hienonemisen vähenemisen ja painuman lievän lisäyksen.



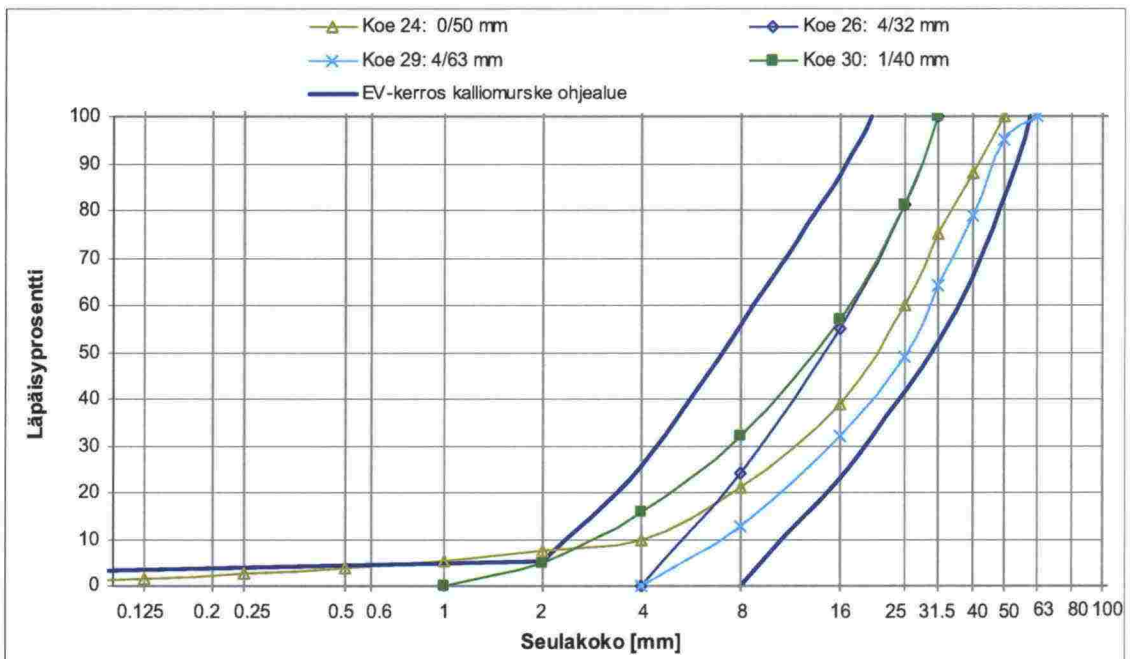
Kuva 6.12. Hienonemisindeksit (vas.) sekä kuormituslevyjen keskimääräiset palautuvat siirtymät ja pysyvät painumat (oik.) kokeissa 25, 26, 27 ja 28.

6.4 Raekokojakautuman vaikutus

Raekokojakautuman vaikutusta kiviainekseen hienonemiseen tarkasteltiin kahdessa eri vertailusarjassa, jotka tehtiin kiviaineksella km 50+700, 225 kPa:n kuormitustasolla ja 50 mm pohjakumipaksuudella. Näiltä osin vertailukelpoisissa kokeissa 5, 7, 8, 11 pohjakumin pinnalla käytettiin peltilevyä ja kuormitusmäärä oli 6.0 miljoonaa sykliä. Kokeet 24, 26, 29 ja 30 tehtiin vastaavasti ilman peltilevyä 3.0 miljoonan kuormituskyklin kokeissa. Käytetyt raekokojakautumat on esitetty kuvissa 6.13 ja 6.14.



Kuva 6.13. Sarjassa 1 (peltilevy pohjakumin päällä) varioidut raekokojakautumat.

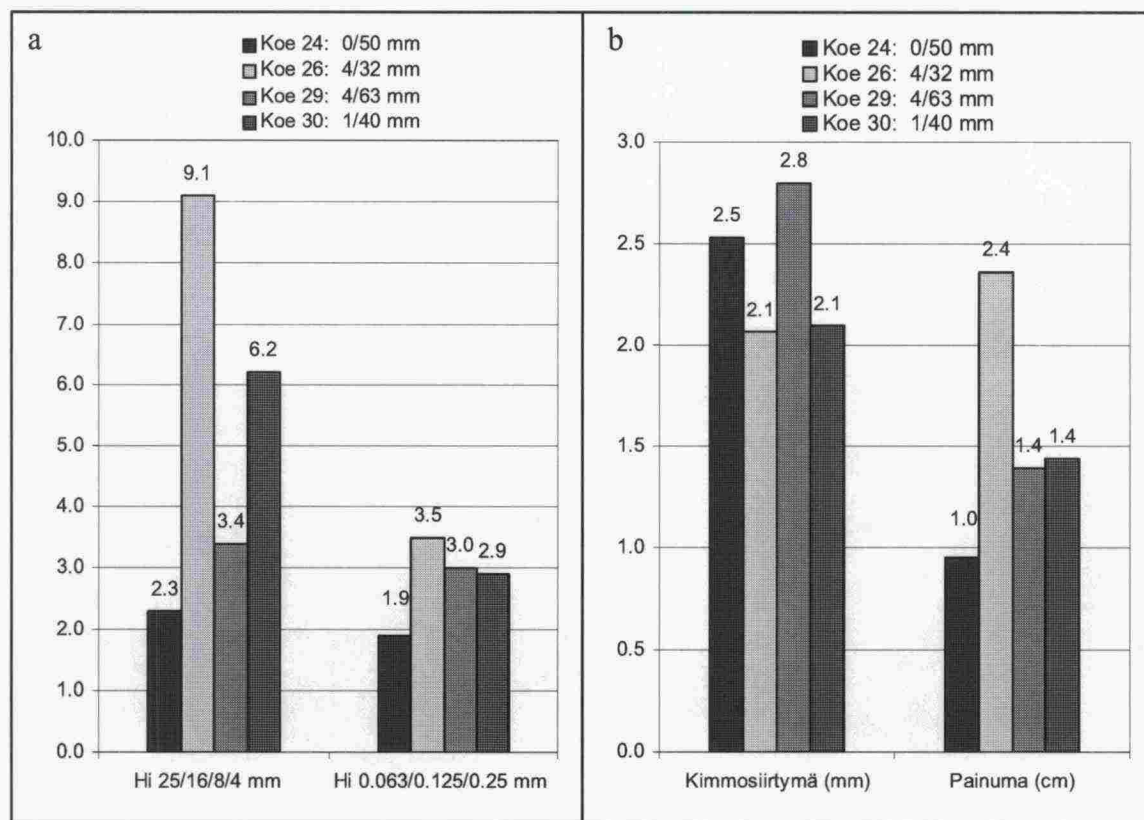


Kuva 6.14. Sarjassa 2 (ei peltilevyä pohjakumin päällä) varioidut raekokojakautumat.

Pohjapelti mukana ollen tehdyissä kokeissa 5, 7, 8 ja 11 kiviaines ei käytännössä hienontunut kuormituksen vaikutuksesta lainkaan. Ainoastaan raekokojakautumalla 4/32 mm (koe 7) tapahtui hyvin vähäistä hienonemista. Tästä syystä raekokojakautuman vaikutusta hienonemiseen ei voitu näiden kokeiden perusteella juurikaan arvioida. Myös kuormituslevyjen keskimääräiset kuormituspulssin aikana tapahtuvat kimmoiset liikkeet olivat kussakin kokeessa samansuuruiset (2.4–2.6 mm). Kuormituslevyjen painumat välillä 0.5–3.0 miljoonaa sykliä olivat vähäisiä, raekokojakautumalla 4/32 mm hieman muissa kokeissa saavutettua tasoa (3.1–3.6 mm) suuremmat (5.1 mm).

Pohjapellin poisto muutti tilannetta siten, että hienonemista tapahtui ja eri raekokojakautumien aiheuttamia eroja pystyttiin havainnoimaan kokeissa 24, 26, 29 ja 30. Näissä kokeissa selvästi voimakkaimmin hienoni tasarakeisin 4/32 mm raekokojakautuman kiviaines kokeessa 26 (vrt. kuva 6.8). Siinä karkeamman aineksen hienonemisindeksi oli 9.1 ja hienorakeisten lajitteiden hienonemisindeksi 3.5 (ks. kuva 6.15). Karkeiden lajitteiden hienoneminen oli 1.5-kertaista toiseksi voimakkaimmin hienontuneeseen 1/40 mm raekokojakautumaan nähden. Rakeisuuksilla 1/40 mm ja 4/63 mm kaikkein hienorakeisimpia lajitteita muodostui keskenään yhtä suuri määrä, mutta karkeampien lajitteiden hienonemisindeksi oli rakeisuudella 4/63 mm selvästi pienempi. Kaikkein vähiten neljästä vertailurakeisuudesta hienoni raekokojakautuman 0/50 mm kiviaines kokeessa 24, joka sisälsi jo valmiiksi noin 10 % kooltaan alle 4 mm rakeita.

Kuormituslevyjen painumien osalta järjestys oli hienonemista vastaava. Rakeisuudella 4/32 mm keskimääräinen painuma oli selvästi suurempi kuin muilla raekokojakautumilla. Kuormituslevyjen palautuva liike oli suurinta (2.8 mm) karkeimmalla 4/63 mm rakeisuudella. Sen suhteen selittävänä tekijänä lienee jännitysten epätasaisuus, eli karkearakeisuudesta johtuen harvat kuormitusta välittävät partikkeliketjut ja niistä johtuva pohjakumin suurempi jousto kuormitusta välittävien partikkeleiden alla. Lievästi kahta muuta rakeisuutta (2.1 mm) suurempaa (2.5 mm) kuormituslevyjen palautuva liike oli vähiten hienontuneella 0/50 mm raekokojakautumalla, jonka osalta kyse saattaa olla itse kiviaineen lievästi alhaisemmasta muodonmuutosmoduulista.



Kuva 6.15. Raekokojakautuman vaikutus hienonemisindeksiin (vas.) sekä kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin ja pysyviin painumiin (oik.).

6.5 Veden ja hienorakeisen aineksen vaikutus

6.5.1 Erikseen

Kun pohjakumin päällä käytettiin peltilevyä, hienoneminen todettiin edellisessä luvussa 6.4 raekokojakautumasta tai pohjan kumipaksuudesta riippumatta käytännössä olemattomaksi kuiville materiaaleille tehdyissä kokeissa 5, 7, 8 ja 12. Kokeessa 11 kiviainekseen raekokojakautuma valittiin jo alun perin sisältämään runsas määrä hienorakeista ainesta, noin 25 % alle 4 mm ainesta. Myöskään hienorakeinen aines alkuperäisessä kiviaineksessa ei kuitenkaan saanut aikaan merkittävää hienonemista kuivana tehdyssä kokeessa 11.

Veden vaikutusta hienonemiseen vaikuttavana tekijänä tarkasteltiin aluksi kokeessa 6 raekokojakautuman 2/50 mm kiviainekselle, joka ei alun perin sisältänyt hienorakeisinta ainesta. Vastaavalle materiaalille ja muilta osin vastaavissa olosuhteissa, mutta kuivana tehdyssä kokeessa 5 vastaava kiviaines ei hienontunut. Kuormituslevyjen tasolle ulotettu vedenpinnan taso, eli täysin vedellä kyllästetty tila ei tilannetta kokeessa 6 muuttanut, eikä kiviaines hienontunut myöskään tässä kokeessa.

6.5.2 Yhdessä

Veden ja hienorakeisen aineksen yhteisvaikutusta kiviaineksen hienonemiseen tarkasteltiin kokeiden 13–18 ja 22 perusteella. Kyseisissä kokeissa kiviaineksen alkuperäinen raekokojakautuma oli 0/50 mm sisältäen raekooltaan alle 4 mm ainesta noin 13 %.

Kokeessa 22 kiviaines saatettiin ennen laatikkoon asentamista materiaalin sekoitusvaiheessa 5 % vesipitoisuuteen, jonka käytetty 0/50 mm raekokojakautuman kiviaines kykeni enimmillään sitomaan. Kokeen aikana haihtuminen estettiin muovikalvon (kuva 6.16) avulla. Viiden prosentin vesipitoisuus kokeessa 22 ei aikaansaanut hienonemisen oleellista lisääntymistä kuivana tehtyihin kokeisiin verrattuna.

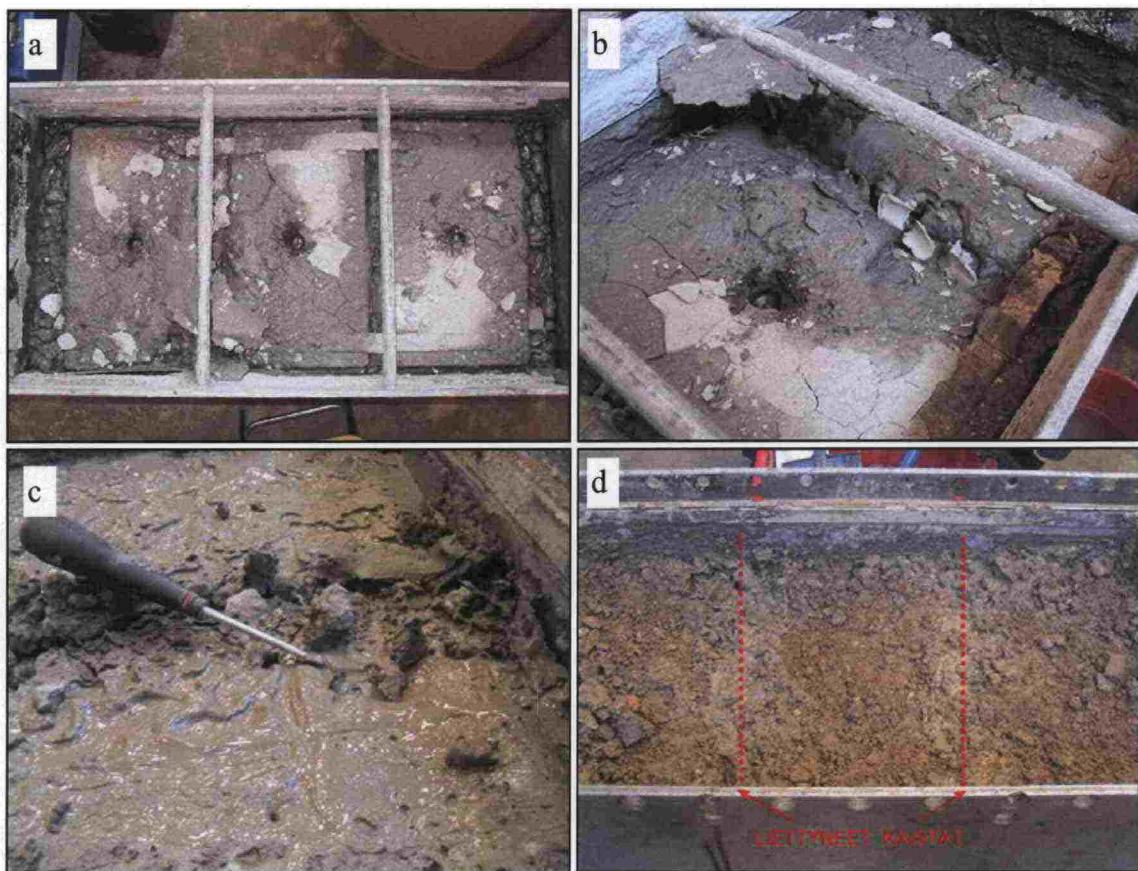


Kuva 6.16. Kosteassa tilassa tehdyissä kokeissa haihtumisen estämiseksi käytetty höyrynsulkuratkaisu (vas.). Järjestelyn ansiosta kiviaines säilyi kauttaaltaan kosteana kokeen ajan (oik.).

Kokeet 17 ja 18 tehtiin raekokojakautumalla 0/50 mm eri kiviaineksille 7 % vesipitoisuudella, jolloin käytetty kiviaines ei pystynyt sitomaan kaikkea vettä. Vedenpinnan taso oli kokeissa noin 8–10 cm materiaalin pohjatason yläpuolella, jolloin noin neljännes kiviaineksesta oli vedellä kyllästetyssä tilassa. Vapaa vesi sai aikaan hienorakeisimpien laitteiden selvää hienonemista edelleen hienoainekseksi huolimatta kokeissa käytetyistä perustapausta alhaisemmista 150 kPa:n kuormitustasoista. Liettynyt hienorakeinen aines oli todennäköisesti kokeen aikana kuormituspulssien alla vedellä kyllästyneen materiaaliolosuhteiden huokostilassa vähäisessä, mutta jatkuvassa liikkeessä, joka hienonsi veden mukana liikunutta ainesta edelleen. Karkeampien rakeiden hienoneminen hioutumisen vastustuskyvyltään paremmassa (vrt. luku 6.6) km 50+700 kiviaineksessa oli olematonta.

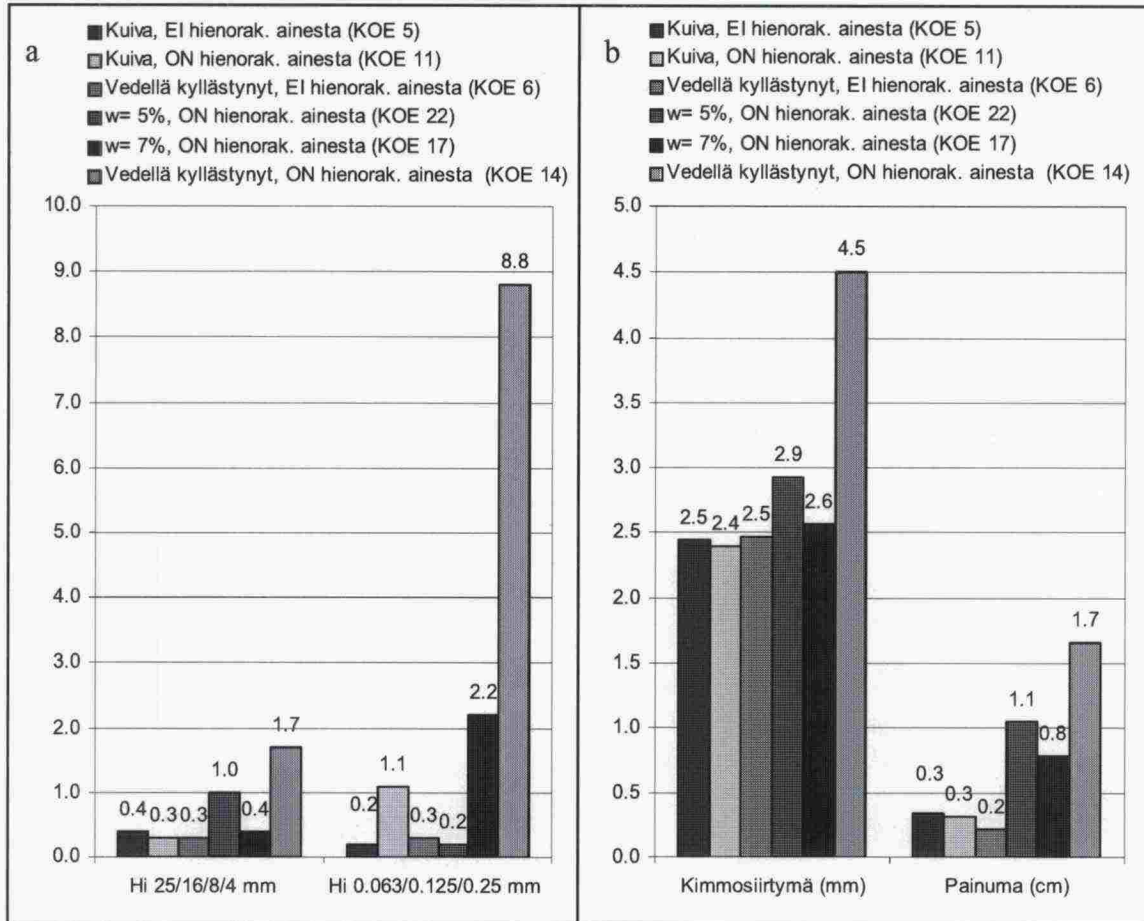
Kokeet 14, 15 ja 16 tehtiin eri kiviaineksille 225 kPa kuormitustasolla ja pohjapeltiä käyttäen siten, että vedenpinta pidettiin kokeen kuluessa kuormituslevyjen yläpinnan tasolla, eli kiviaines oli kauttaaltaan vedellä kyllästetty. Kiviainesten hienoneminen kyseisissä järjestelyissä oli materiaalista riippumatta dramaattista (ks. kuva 6.17). Hienorakeisten laitteiden hienonemisindeksi vaihteli kokeissa välillä 8.8–10.9 (kuva 6.18). Erityisen huomattavaa kokeissa oli se, että käytännössä kaikki rackooltaan alle 2 mm aines hioutui kokeissa hienoainekseksi (<0.063 mm). Lisäksi syntynyt hienoaines oli hyvin hienojakoista, sillä siitä yli 90 % oli partikkelikooltaan alle 0.02 mm ja savespitoisuus (<0.002 mm) oli 50–60 %. Vastaavat osuudet hienoaineksista ennen koetta olivat noin 50 % (<0.02 mm) ja 10 % (<0.002 mm) (vrt. taulukko 4.2).

Kokeiden 14–16 erittäin voimakas hienoneminen oli seurausta siitä, että kuormituspulssit saivat veteen liettynneen hienorakeisen aineksen jatkuvaan pumppauksenomaiseen liikkeeseen koko materiaalin huokostilassa. Liikkuva massa hioi voimakkaasti ennen muuta itseään, eli liikkeessä mukana ollutta ainesta. Karkeiden rakeiden hioutuminen oli selvästi vähäisempää ja riippui kiviaineksen hioutuvuudesta (vrt. luku 6.6). $Hi_{25/16/8/4}$ mm vaihteli välillä 1.7–3.4. Liettynneen hienoainesmassan liike vaikutti kokeissa suuntautuvan kuormittavan levyn alta levyjen väliin ja siitä edelleen ylöspäin materiaalin pinnalle. Tätä puolsivat näytteen purun yhteydessä kuormituslevyjen väleissä havaitut liettynneet alueet (kuva 6.17d) sekä toisaalta kokeen kuluessa materiaalin pinnalle pumppautunut liettynyt aines (kuva 6.17a ja b).



Kuva 6.17. Vedellä kyllästetyssä tilassa hienorakeista ainesta sisältäville kiviaineksille tehdyissä kokeissa havaittua voimakasta hienontumista. Materiaalin pinnalle pahimmillaan pumppautunutta liettynyttä ainesta (a ja b), liettynyttä ainesta kuormituslevyjen alla kokeen jälkeen (c) ja syvemmällä materiaalissa kuormituslevyjen väleille sijoittuvat liettyneen aineksen alueet (d).

Myös pulssien aikana mitatut kuormituslevyjen palautuvat siirtymät ja pysyvät painumat olivat kokeissa 14, 15 ja 16 erittäin suuria. Kenties kokonaisjoustoja suurempi merkitys on kuitenkin kuormituksen heikolla jakaantumisella kiviaineksessa. Keskimmäisen kuormituslevyn alapuolelta reunimmaisten kuormituslevyjen iskiessä mitattu pohjakumin jousto oli maksimijoustoan verrattuna suhteellisen vähäinen vastaavalla tavalla, kuten kokeen 4 osalta kuvassa 6.6 esitettiin. Veden ja hienoaineksen dramaattinen yhteisvaikutus hienonemiseen ja siirtymiin havainnollistuu kuvassa 6.18.

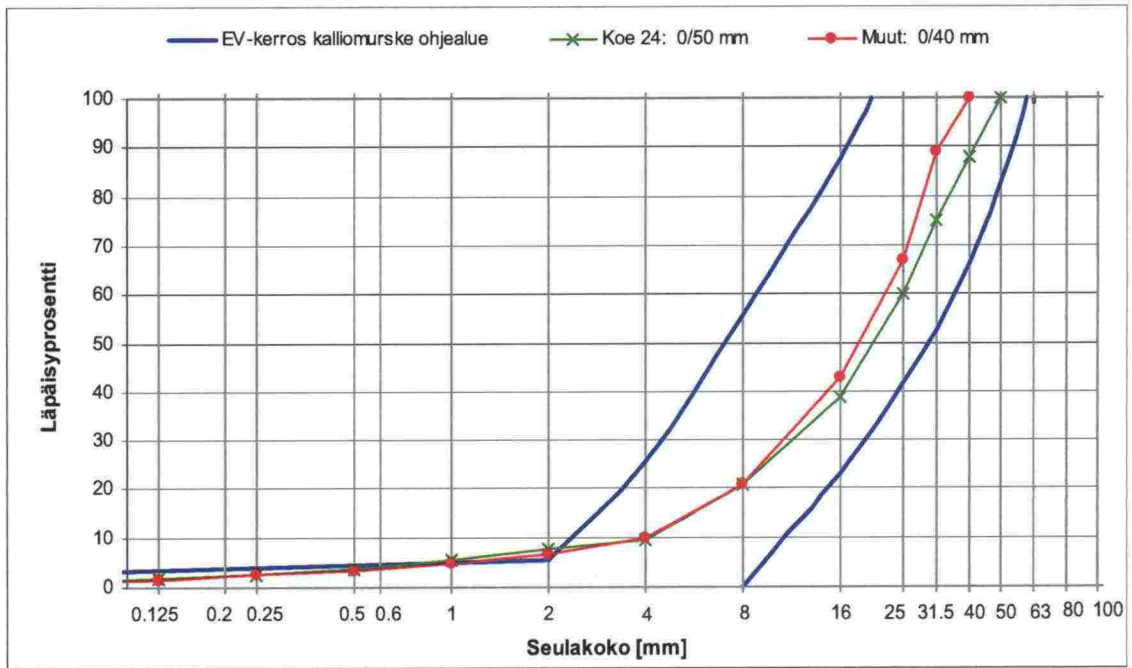


Kuva 6.18. Veden ja hienorakeisen aineksen vaikutus erikseen ja yhdessä hienonemisindeksiin (vas.) sekä kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin ja pysyviin painumiin (oik.). Periaatteelliset vaikutukset käyvät kuvasta ilmi huolimatta siitä, että kokeet 17 ja 14 olivat kestoltaan 3.0 miljoonan kuormitus sykliä muiden ollessa 6.0 miljoonaa sykliä. Lisäksi kokeessa 17 kuormitustasona oli 150 kPa ja muissa kokeissa 225 kPa.

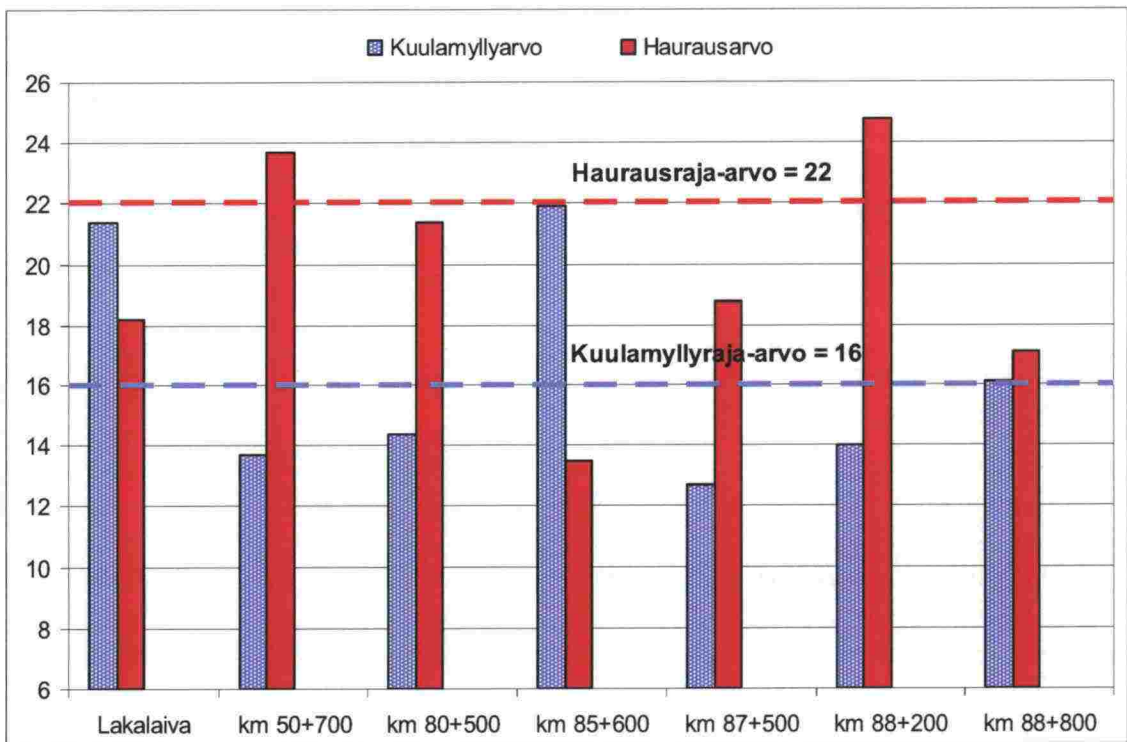
6.6 Kiviaineslaadun vaikutus

Kiviaineksen laadun vaikutusta hienonemiseen tarkasteltiin kokeiden 24, 31, 32, 33, 34 ja 35 tuloksista. Kokeet tehtiin 3.0 miljoonan syklin kestoisina, 225 kPa kuormituksella ja 50 mm pohjakumipaksuudella. Erojen esille saamiseksi pohjakumin päällä ei käytetty peltilevyä. Kiviaineksen raekokojakautumana kokeissa oli kuvassa 6.19 esitetyn mukainen 0/40 mm, paitsi kokeessa 24 (kiviaines km 50+700), jossa raekokojakautuma poikkesi tästä siinä määrin vähäisesti (0/50 mm, kuva 6.19), että se otettiin mukaan vertailuun. Vertailuun valittu raekokojakautuma pohjautui todellisessa rakentamistilanteessa Oikoradalla käytettyihin raekokojakautumiin.

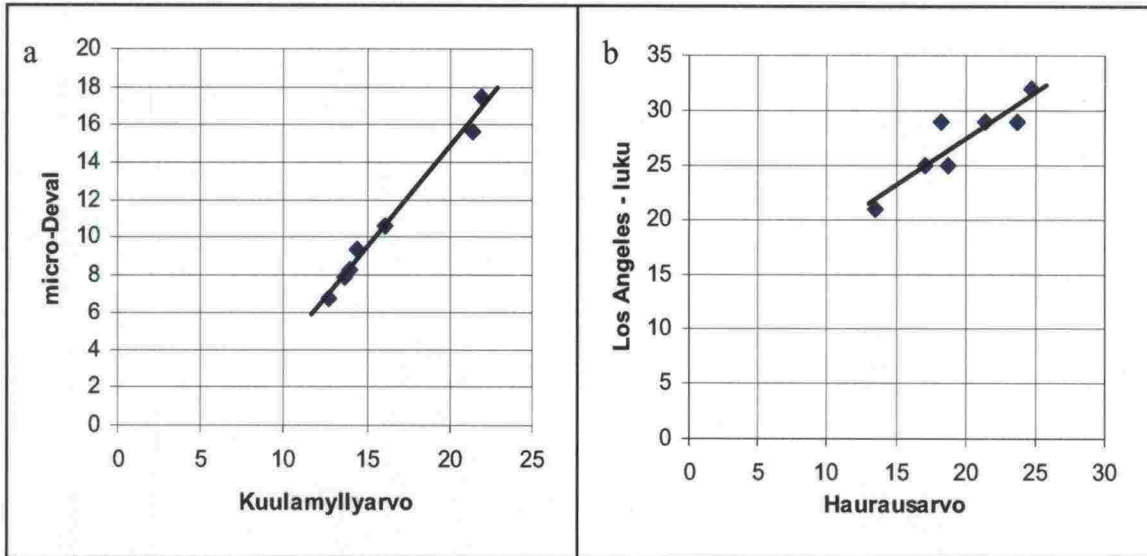
Tarkastelluille kiviaineksille tehtyjen eri lujuustestien (vrt. luku 3.4.3) tuloksia on esitetty kuvissa 6.20 ja 6.21 sekä tarkemmin liitteessä 3. Kiviainesten pyrittiin valitsemaan ennakkotutkimusten perusteella siten, että osa kiviaineksista ei täyty iskunkestävyyttä kuvaavalle haurausarvolle asetettua (Ratahallintokeskus, 1999) raja-arvoa ja osa vastaavasti ylittää hioutuvuutta kuvaavan kuulamylykokeen raja-arvon (kuva 6.20). Kuulamylykokeen havaitaan kuvasta 6.21a korreloivan erittäin hyvin EN-standardin mukaiseen uuteen hioutuvuuden testimenetelmään, micro-Devaliin. Myös haurausarvon ja Los Angeles-luvun välillä havaitaan voimakas korrelaatio (kuva 6.21b).



Kuva 6.19. Kiviainesten rakeisuuskäyrät kokeissa 24, 31, 32, 33, 34 ja 35, joissa tarkasteltiin kiviaineksen laadun vaikutusta hienonemiseen.



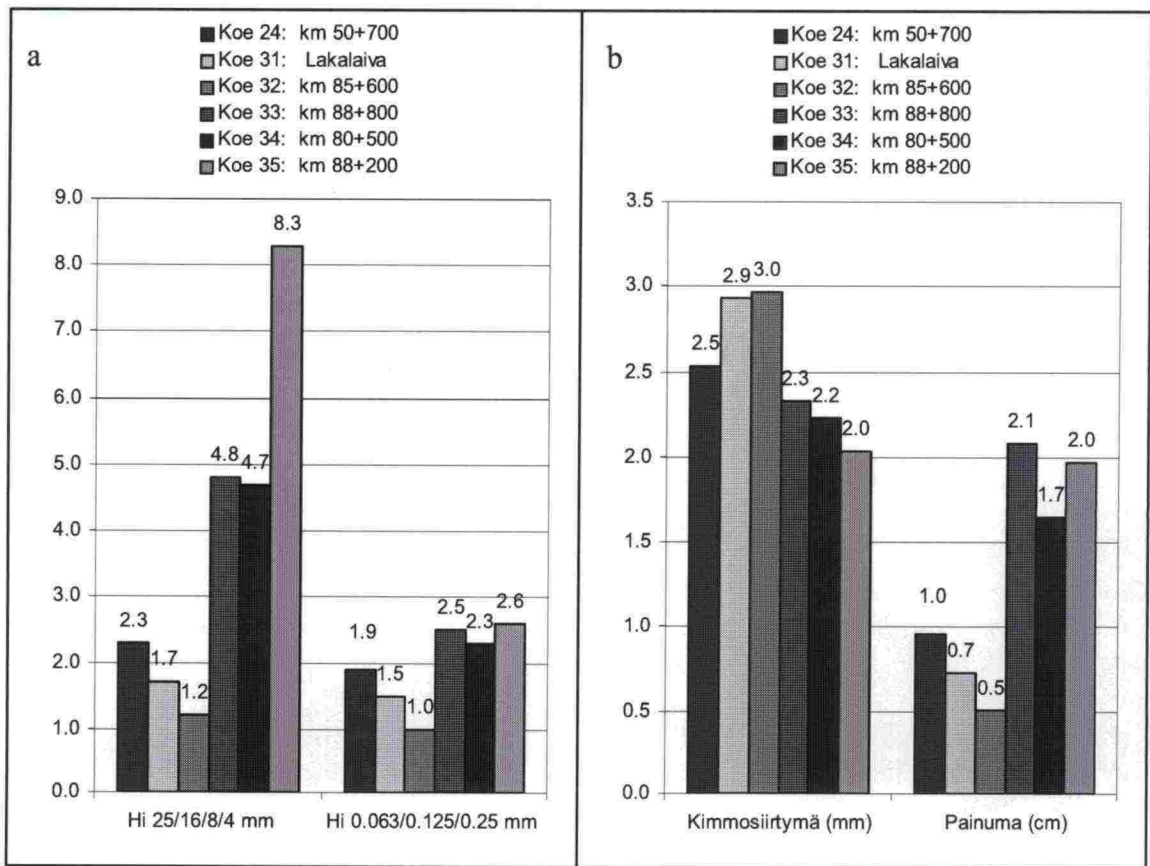
Kuva 6.20. Tarkasteltujen kiviainesten kuulamyly- ja haurausarvot sekä eristys- ja väli-kerroksen kalliomurskeelle näiltä osin voimassa olevat raja-arvot.



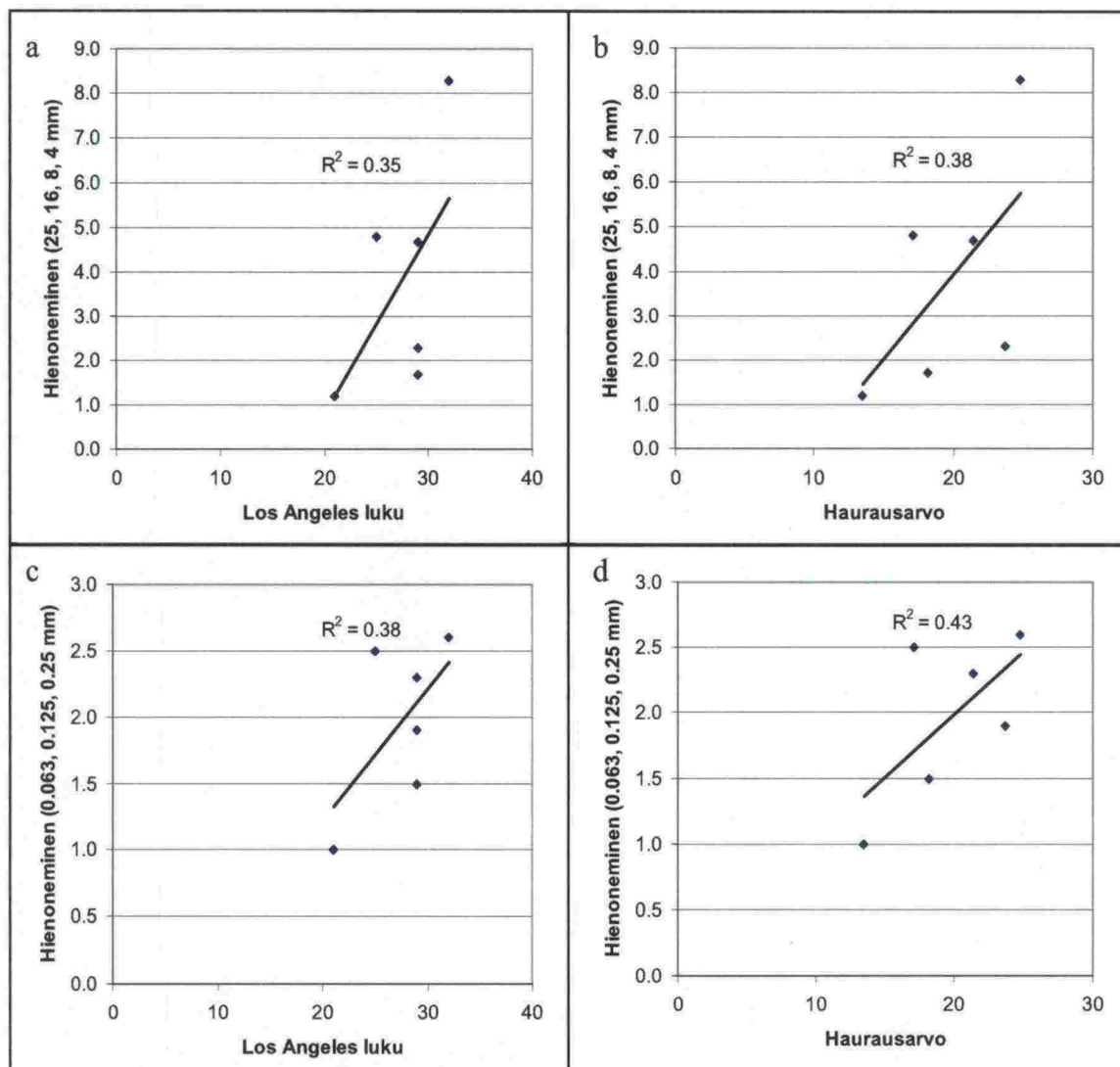
Kuva 6.21. Vanhojen lujuustestimenetelmien (kuulamyly ja haurausarvo) vastaavuus uusiin EN-standardin mukaisiin testimenetelmiin (micro-Deval ja Los Angeles-koe) tutkituissa kiviaineksissa.

Kiviaineslaadun vaikutusta tarkastelevissa kokeissa havaitut hienonemiset, kuormituslevyjen palautuvat liikkeet ja pysyvät painumat on esitetty kuvissa 6.22. Karkeampien laitteiden hienoneminen oli selvästi suurinta kiviaineksella km 88+200 (koe 35), joka voidaan lujuuskokeiden tuloksista havaita myös iskunkestävyydeltään heikoimmaksi. Vastaavasti ehkä hiukan yllättäen selvästi vähiten hienonivat lujuustestien perusteella hioutuvuuden kestävyydeltään selvästi heikoimmat km 85+600 ja Lakalaivan kiviainekset, jotka toisaalta olivat iskunkestoltaan vertailumateriaalien parhaimpia. Lisäksi, kuten jäljempänä esitetään, hioutuvuuden vaikutus on oleellisesti merkittävämpi kosteassa ympäristössä, mikä ei tullut näissä kuivissa olosuhteissa tehdyissä kokeissa huomioiduksi. Siirtymien osalta voitiin hiukan ristiriitaisena havaintona todeta, että vähiten hienontuneissa Lakalaivan ja km 85+600 kiviaineksissa kuormituspulssin aikana palautuva kuormituslevyjen siirtymä oli hieman suurempi kuin muissa kiviaineksissa. Toisaalta hienonemistulosten kanssa yhtenevästi kuormituslevyjen pysyvä painuma välillä 0.5–3.0 miljoonaa sykliä oli km 85+600 ja Lakalaivan kiviaineksissa pienin.

Lähinnä iskunkestävyyttä kuvaavien haurausarvo- ja Los Angeles-kokeiden tulosten selvä yhteys hienonemiseen on nähtävissä kuvista 6.23. Iskunkestävyyden heikentyessä hienoneminen lisääntyy selvästi, joskin yhteys ei hajonnasta johtuen ole yksikäsitteinen, eli hienonemiseen vaikuttaa kiviaineksen iskunkestävyyden ohella myös muita tekijöitä.



Kuva 6.22. Kiviaineksen laadun vaikutus hienonemisindeksiin (%), kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin (mm) ja pysyviin painumiin (cm) kuivissa materiaaleissa.

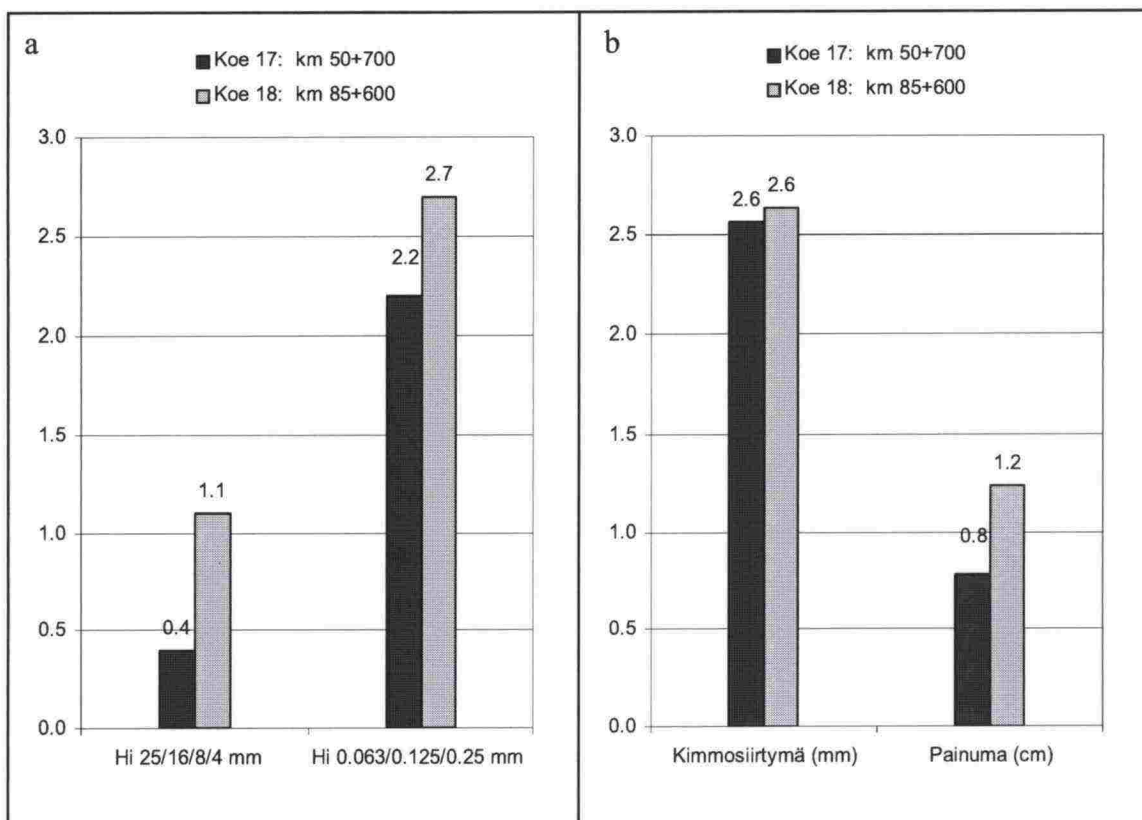


Kuva 6.23. Havaittu karkeampien ja hienorakeisten lajitteiden hienonemisen yhteys kiviaineksen Los Angeles-lukuun ja haurausarvoon.

Kokeet 17 ja 18 tehtiin raekokojakautumalla 0/50 mm eri kiviaineksille 7 % vesipitoisuudella, jolloin käytetty kiviaines ei pystynyt sitomaan kaikkea vettä (vrt. luku 6.5.2). Laatikon pohjalla noin neljänneksen materiaalista (8-10 cm) peittänyt vapaa vesi sai aikaan hienorakeisimpien lajitteiden selvää hienonemista edelleen hienoainekseksi. Karkeamman aineksen hienoneminen oli molemmissa kokeissa melko vähäistä, mikä selittyy alhaisella 150 kPa kuormitustasolla. Veden mukanaolon myötä myös kiviaineksen hioutuvuuden merkitys tuli esiin, sillä hioutuvuuden kestävyydeltään paremmassa (vrt. kuvan 6.20 kuulamyly- ja micro-Deval-arvot) km 50+700 kiviaineksessa hienoneminen oli vähäisempää kuin heikommassa km 85+600 kiviaineksessa (kuva 6.24).

Liettynyt hienorakeinen aines materiaalin pohjalla oli todennäköisesti kokeen aikana kuormituspulssien ja tärinän vaikutuksesta vedellä kyllästyneen materiaalikerroksen huokostilassa vähäisessä, mutta jatkuvassa liikkeessä, joka hienonsi veden mukana liikkunutta ainesta edelleen. On huomattava, että karkeampien rakeiden hioutumista ei tapahtunut ($Hi_{25/16/8/4\text{ mm}} = 0.4$) hioutumisen vastustuskyvyltään paremmassa km 50+700 kiviaineksessa. Selvästi huonomman kuulamyly- ja micro-Deval-arvon omaavassa

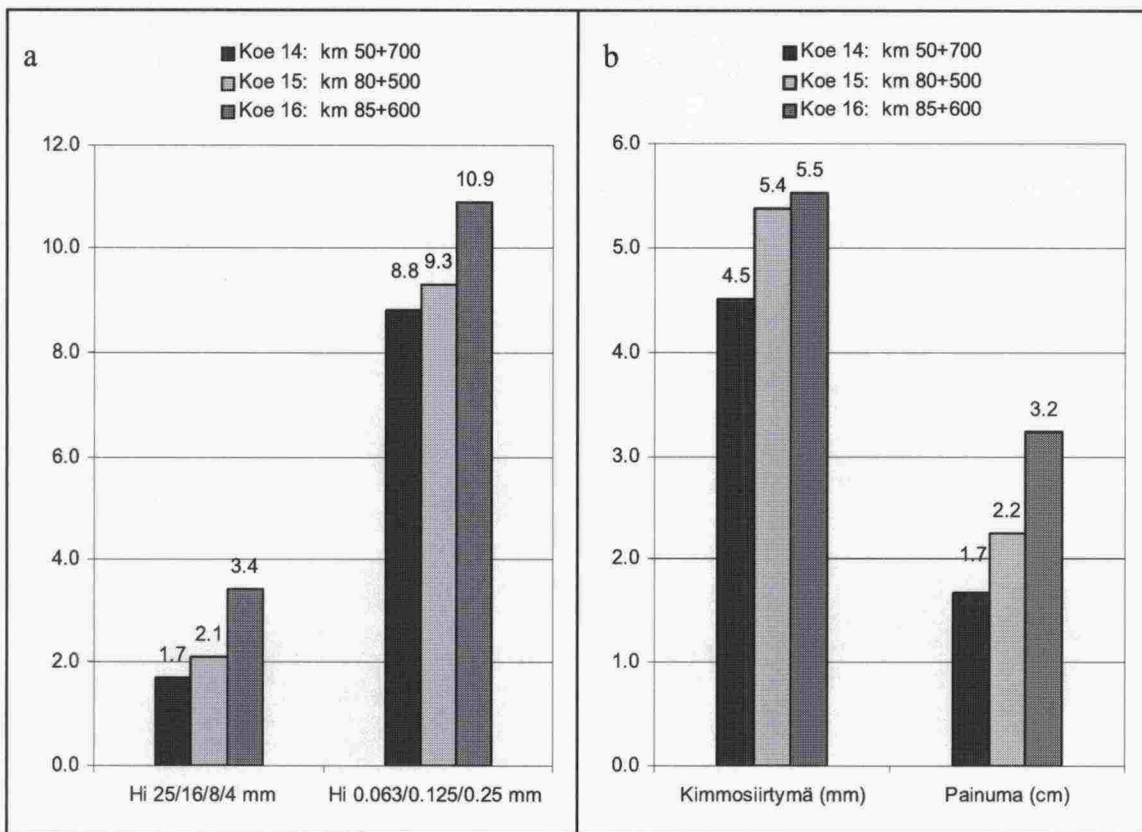
kiviaineksessa km 85+600 em. jatkuva liike oli ilmeisesti riittävää hienontamaan myös karkeampia rakeita, joskin hyvin vähäisessä määrin ($Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}} = 1.1$). Myös kuorituslevyn painuma oli hiukan suurempi kiviaineksella km 85+600.



Kuva 6.24. Kiviaineksen laadun vaikutus hienonemisindekseihin (vas.) sekä kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin ja pysyviin painumiin (oik.) kosteassa ($w=7\%$) ja pohjaosastaan vedellä kyllästyneessä materiaalissa.

Kokeet 14, 15 ja 16 tehtiin pohjapeltiä käyttäen 225 kPa kuormitustasolla raekoko-jakaumaltaan 0/50 mm kiviaineksille täysin vedellä kyllästetyssä tilassa vedenpinnan ulottuessa kuormituslevyjen tasolle. Hienoneminen oli erittäin voimakasta kaikissa kokeissa (vrt. luku 6.5.2). Kiviaineslaatujen vaikutusta vertailtaessa kuvasta 6.25 havaitaan kiviaineksen hienonemisen ja kuormituslevyjen painumien kasvavan kiviaineksen hioutuvuuden kestävyden (vrt. kuva 6.20 ja liite 3) heikentyessä. Voimakkainta hienoneminen oli heikoimman kuulamylly- ja microDeval-arvon kiviaineksessa km 85+600. Myös kuormituslevyjen painuma oli suurinta kyseisellä kiviaineksella.

Havaintojen perusteella kuivassa tai lievästi kosteassa tilassa kiviaineksen iskun-kestävyytestit (haurausarvo ja Los Angeles-luku) kuvaavat sen kestävyyttä parhaiten. Märissä olosuhteissa hioutuvuusominaisuuksien merkitys korostuu ja muuttuu määrääväksi, mikäli kiviaines joutuu olemaan hienoainesta sisältävän hiovan vesimassan liikkeen mahdollistavassa täysin kyllästyneessä tilassa.



Kuva 6.25. Kiviaineksen laadun vaikutus hienonemisindeksiin (vas.) sekä kuormituslevyjen palautuviin siirtymiin ja pysyviin painumiin (oik.) täysin vedellä kyllästetyissä materiaaleissa.

6.7 Raidesepelin tukemisen vaikutus

Raidesepelikokoluokan (16/63 mm) kiviainesta tarkasteltiin kuivakokeissa 20 ja 21. Molemmissa kokeissa kiviaineksena oli km 50+700, kuormitustasona 300 kPa ja pohjan joustokumin paksuus 30 mm. Pohjakumin päällä oli kokeissa peltilevy ja kokeissa käytettiin kuvan 3.14b mukaisia ohjurimäntiä kuormituslevyjen hallitsemattoman kääntyilyn estämiseksi. Kokeiden kesto oli 3.0 miljoonaa kuormitus sykliä.

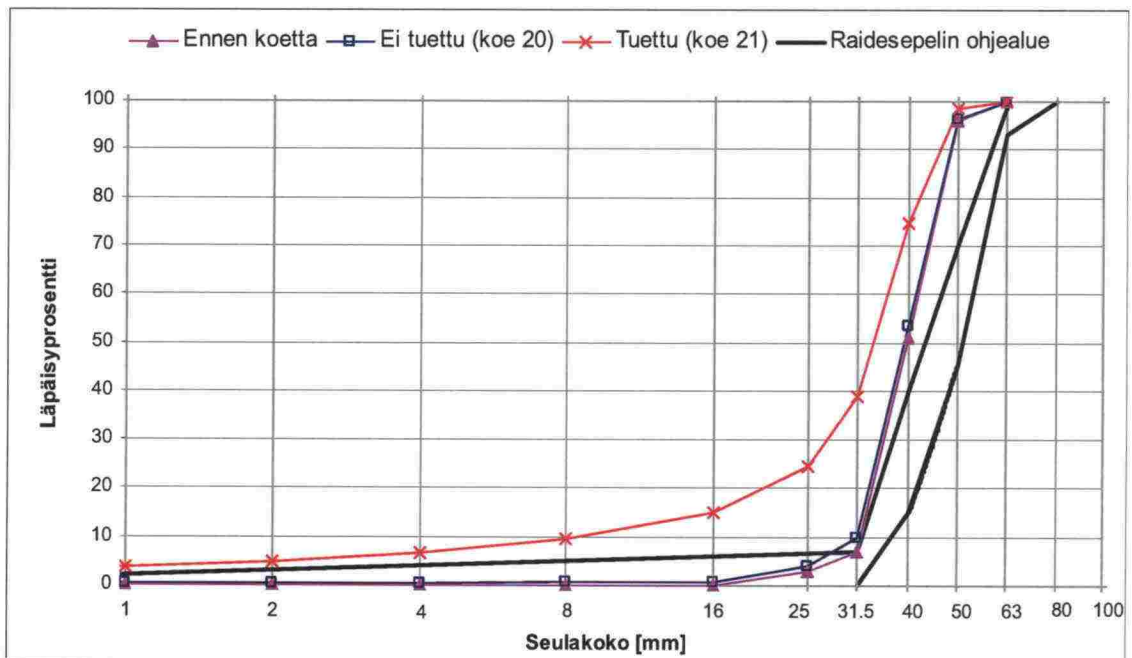
Tavanomaisella tavalla tehdyssä kokeessa 20 kiviaines ei käytännössä hienontunut. Kokeessa 21 pyrittiin simuloimaan raidesepelin tukemista kuvan 6.26 mukaisella järjestelyllä. Ratapölkkyjä simuloivat kuormituslevyt nostettiin irti kiviaineksesta, jonka jälkeen kuormituslevyn alle asennettiin tarvittaessa täydennyssepeleä ja työnnettiin kiviainekseen tukemishakulla varustetulla poravaralla (Hilti TE 75) neljä kertaa kunkin kuormituslevyn molemmille sivuille. Välittömän murskausvaikutuksen lisäksi kuvatus mukainen tukemishakun työntö sekoitti kuormituslevyn alla aiempien kuormitus syklien vaikutuksesta tiivistynyttä kiviainesta, kuten on tilanne myös todellisen tukemisen suhteen. Tukeminen toistettiin kokeen ensimmäisen kahden miljoonan kuormitus syklin kuluessa 11 kertaa, eli noin 200 000 kuormitus syklin välein.

Tukemisen simuloimiseksi tehdyn järjestelyn vaikutus kiviaineksen hienonemiseen oli ratkaisevan merkittävä. Etenkin karkeiden rakeiden hienoneminen oli hyvin voimakasta ($Hi_{25/16/8/4 \text{ mm}} = 13.1$), selvästi suurempaa kuin missään muussa aiemmin kuvatussa koejärjestelyssä. Hienonemisen voimakkuus havaitaan selkeästi kuvassa 6.27 esitetyistä

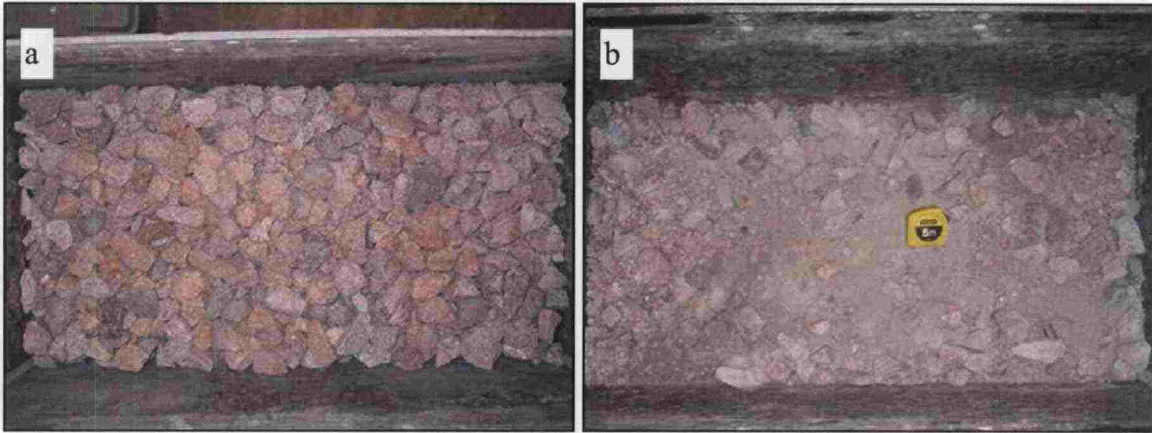
rakeisuuskäyristä ja kuvasta 6.28. Havainnon perusteella on selvää, että tukemishakkujen välitön kiviainesta murskaava vaikutus on yhdessä tukemisen aiheuttamasta materiaalin sekoittumisesta seuraavan partikkelien voimistuvan uudelleenjärjestäytymisen kanssa erittäin merkittävä tekijä raideseppelin hienonemisessa. Kuvassa 6.29 on esitetty yksittäisen kuormituslevyn painuman kehittyminen kokeen kuluessa. Kuvasta nähdään, kuinka kuormitus syklien tiivistävän vaikutuksen seurauksena hidastunut painumakehitys kiihtyy voimakkaasti uudelleen tukemisen jälkeisten kuormitus syklien aikana. Hienontavan vaikutuksen lisäksi tukemisen jälkeinen nopea painuminen rajoittaa toimenpiteellä saavutettavaa hyötyä.



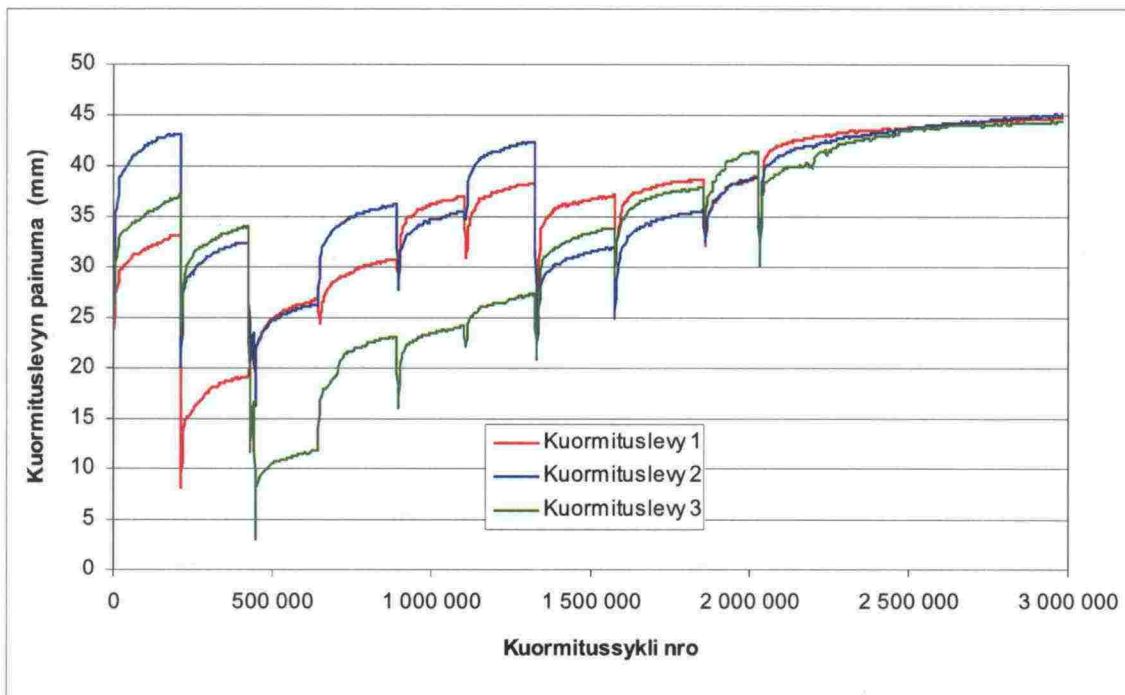
Kuva 6.26. Järjestely raideseppelin tukemisen simuloimiseksi.



Kuva 6.27. Raideseppelikokoluokan kiviainesten raekokojakautumat ennen ja jälkeen kokeen.



Kuva 6.28. Tukemissimulointikokeen kiviainesta ennen (vas.) ja jälkeen (oik.) kokeen.



Kuva 6.29. Kuormituslevyjen painumakäyrät tukemiskokeessa (koe 21). Tukemisen vaikutus ilmenee painuman hetkellisenä pienenemänä ja sitä seuraavana nopeana kasvuna.

7 YHTEENVETO TULOKSISTA JA MATERIAALISUOSITUKSET

7.1 Tukikerrosnäytteet

Eri puolilta rataverkkoa vuosikymmenten käyttöön jälkeen otettujen tukikerrosnäytteiden ominaisuuksia tarkasteltiin useissa eri laboratoriokokeissa. Kokeissa tarkasteltiin näytteiden rakeisuuksien ohella kiviainesten vedenimua sekä erityisesti näytteiden sisältämien hienoainesten ominaisuuksia. Koetulosten perusteella voitiin arvioida raideseplikiviainesten hienonemismekanismeja sekä eroja näytteiden sisältämien hienoainesten laadussa ja vahingollisuudessa. Todellisessa kuormitusympäristössä hienontuneiden tukikerrosnäytteiden ohella kokeissa tarkasteltiin erityisesti alusrakennemateriaalien vertailumateriaaleina joitakin uusia kalliomurskeita sekä luonnon lajittelemia sora- ja hiekkamateriaaleja.

Tukikerrosnäytteiden rakeisuuden luokittelussa on käytetty 1 mm, 8 mm ja 25 mm seulakokojen läpäisyprosenttien summana ilmoitettavaa rakeisuuslukua. Tukikerroksen toimintakykyä heikentää kuitenkin ensisijassa sen sisältämä kaikkein hienorakeisin aines. Toisaalta hienoainespitoisuuden (<0.063 mm) määrittäminen edellyttää kuiva-seulontaa työläämpää pesuseulontaa. Uuden raideseppelin raekokojakautuman muuttuminen 25/55 mm:stä 31.5/63 mm:iin vuonna 1995 puoltaa kuitenkin 25 mm seulan jättämistä pois hienontuneisuuden tarkastelusta. Tästä syystä tukikerroksen laatua on jatkossa mielekkäintä arvioida 1 mm ja 8 mm seulojen läpäisyprosenttien summasta, jolloin luku 35 vastaa likimäärin nykyisin puhdistusrajana pidettyä rakeisuuslukua 88. On kuitenkin selvää, että elinkaaritalloudellisinta tukikerroksen puhdistusrajaa tulisi edelleen tutkia pyrkien raideseppelin kunnan linkittämiseen raidegeometrian poikkeamiin, niiden toistuvuuteen sekä tukemisen tehokkuuteen.

Tukikerroksen jäljellä olevaa toimintakuntoa arvioitaessa raideseppelinäytteiden rakeisuuksia tulee tarkastella tietyn pituisilla radan osuuksilla keskimäärin. Kun rakeisuusluvut on kuvattu ratakilometrien suhteen, lukujen keskimääräisessä tasossa on pystytty havaitsemaan muutos sepelikiviaineksen lujuuden vaihtuessa. Kiviaineksen lujuuden ja sen hienonemiskehityksen perusteella on luotu menettely elinkaarikustannuksiltaan edullisimman raideseppelilaadun valitsemiseksi (Nurmikolu, 2000). Toisaalta tukikerrosnäytteiden rakeisuus vaihtelee kuitenkin merkittävästi myös saman sepelikiviaineksen alueella jopa peräkkäisiltä kilometreiltä otettujen näytteiden välillä. Näytteenotto on syytä tehdä erityisen tarkasti, mutta vaihtelu ei selity näytteenoton epätarkkuuksilla, sillä vierekkäisistä ratapölkkyväleistä huolellisesti otettujen näytteiden rakeisuuksien on havaittu poikkeavan toisistaan suhteellisen vähän. Tästä syystä on selvää, että raideseppelin hienontumiseen vaikuttaa merkittävästi myös sepelikiviaineksen laadusta riippumattomat rakenteelliset ja ympäristöön liittyvät tekijät, joita tulee tarkastella jatkotutkimuksissa.

Hienorakeinen aines kerääntyy tukikerroksen pohjalle, mistä syystä tukikerroksen hienontuneisuuden vaikutuksia arvioitaessa sopivimman näytteenottotason valinta on kaksitahoinen asia: Yhtäältä tukikerroksen muodonmuutosominaisuuksien ja raiteen tuettavuuden kannalta saattaa olla riittävää, että välittömästi ratapölkyn alapuolella olevassa kiviaineksessa on jäljellä hienorakeisesta aineksesta vapaata huokostilaa. Toisaalta veden pidättymisen ja routimisherkkyyden suhteen hienoaines tukikerroksessa

on vahingollista korkeustasosta riippumatta, mikä asettaa vaatimuksen sepelin-puhdistuksen ulottamiseksi riittävän syvälle.

Esimerkiksi Ruotsissa käytössä oleva sydännäytekaira mahdollistaa näytteenoton koko tukikerroksesta ja lisäksi sen alapuolelta minimoiden samalla näytteenoton satunnais-vaihtelut. Käynnissä oleva maatutkauksen kehitystyö saattaa jatkossa johtaa vain referenssinäytteenottoa edellyttävän raidesepelin kunnan arviointimenetelmän käyttöön-ottoon. Raidesepelin on havaittu hienonevan erityisesti kiskoja alapuolella ja rata-pölkkyjen päissä. Rataosalla Tpe-Orv vastavaihdettujen betoniratapölkkyjen rikkoontuminen yhdistettiin raidesepelin epätasaiseen hienonemiseen raiteen poikki-leikkauksessa, kun raiteen keskellä raidesepelin hienoneminen voitiin havaita hyvin vähäiseksi.

Ratojen perusparannusten yhteydessä on huomionarvoista tarkastella tukikerroksessa olemassa olevan raidesepelin lujuutta suhteessa nykyvaatimuksiin. Tällöin on syytä harkita, onko mielekäästä palauttaa lujuudeltaan heikkoa kiviainesta seulonnan yhteydessä rataan, etenkin jos täydennyssepeliltä vaaditaan kuitenkin suurta lujuutta.

Yleisessä tapauksessa tukikerrosnäytteiden hienoainesten mineraalikoostumuksesta pääosan muodostivat yleisimmät kivimineraalit, kvartsi, maasälvät ja amfibolit, joiden keskimääräiseksi osuudeksi näytteiden mineraalisessa hienoaineksessa todettiin noin 80 %. Havainto oli sikäli positiivinen, että tuhansia kertoja laajemmasta ominaispinta-alastaan huolimatta kovista mineraaleista koostuva aines vaikuttaa täten rakenteessa kemiallisen rapautumisen suhteen vastustuskykyiseltä myös esiintyessään hieno-aineksena. Toisaalta pelkän hienorakeisimman aineksen vähäinen muuttuminen ei todennäköisesti olisi ratkaisevalla tavalla eristys- ja välikerrosten materiaalien toimintakykyä heikentävä tekijä. Vaikutusta toimintakykyyn alkaa ilmetä, kun rapautuminen on edennyt partikkeleiden huokoisuutta ja veden sitoutumista lisääväksi. Tämän asteista rapautumista voitiin havaita vain muutamassa yksittäisessä tukikerrosnäytteessä, mutta toisaalta varsin suurissa määrin kahdessa vertailuaineistona käytetyssä soramateriaalissa. Ratkaiseviksi kemiallisen muuttumisen haitalliset vaikutukset muodostuisivat siinä vaiheessa, kun rapautumisen seurauksena kiviaineksen koko kiven rakenne löyhtyy mekaaniselle hienonemiselle alttiimmaksi. Näin pitkälle edennyt rapautuminen ei tukikerrosnäytteissä esiintynyt. Heikkoja, rapautumisherkkiä tai rapautumisen tuloksena syntyviä mineraaleja, lähinnä kiilteitä, kloriittia, talkkia, kalsiittia ja savimineraaleja esiintyi näytteiden hienoaineksissa yleensä suhteellisen vähän, kun otetaan huomioon niiden todennäköinen rikastuminen hienoainekseen.

Tukikerrosnäytteille ja erityisesti niiden hienoaineksille tehtyjen tarkastelujen perusteella rataverkollamme olevien raidesepelikiviainesten hienoneminen on pääasiallisesti seurausta lähinnä liikennekuormituksen ja tukemisen, harvoissa tapauksissa ehkä osittain myös pakkasrapautumisen, aiheuttamasta rakeiden mekaanisesta lohkeamisesta ja hioutumisesta. Tällöin erot syntyvän hienoaineksen laadussa ovat suhteellisen vähäisiä. Selkeää murskauksen jälkeen tapahtunutta kemiallista rapautumista voitiin havaita ainoastaan yhdessä näytteessä (Tmj-Raa 714+600), jossa opaakkimineraalit ja kiille olivat rapautuneet aiheuttaen rautayhdisteiden saostumista rakeiden pinnoille. Tässäkin tapauksessa rapautuminen oli rajoittunut pääosin rakeiden pinnoille siten, että syvemmillä rakeissa kiven lujuus ei ollut rakenteessa ollessaan oleellisesti heikentynyt. Merkittävästi rapautuneita

kiviainesrakeita esiintyi myös näytteessä Tor-Kol 920+180, mutta tässä tapauksessa rapautuminen oli mitä ilmeisimmin tapahtunut ennen kiviaineksen asentamista rataan ja olisi tullut esille nykyisin CE-merkinnän saamiseksi edellytetyissä tarkasteluissa.

Joidenkin vertailunäytteinä tarkasteltujen karkearakeisten luonnollisten maalajien ominaisuudet poikkesivat tukikerrosnäytteistä selvästi epäedullisempaan suuntaan. Myös hajonta sorien ja hiekkojen ominaisuuksissa oli suurempaa kuin rakenteessa hienontuneissa kalliomurskeissa. Tämä puoltaa käsitystä siitä, että kulkeutumisen ja kerrostumisen aikana tapahtuneesta valikoitumisesta huolimatta jotkut luonnolliset sora- ja hiekkamateriaalit ovat rapautuneet vuosituhansien kuluessa ominaisuuksiltaan selvästi vahingollisemmiksi. Rakenteessa muutamien murskauksen jälkeisten vuosikymmenten aikana tapahtuneessa kalliomurskeiden hienonemisessa vastaavaa laadullisten ominaisuuksien yhtä merkittävää heikkenemistä ei ole tapahtunut. Asialla on merkitystä erityisesti ajatellen eristys- ja välikerrosten materiaaleja, joiksi kalliomurske saattaa tässä suhteessa yleistettynä soveltua jopa paremmin kuin luonnon lajittelemat maa-ainekset, kunhan murskekiviaines ei hienone oleellisesti rakenteessa. Tämä edellyttää tutkimushankkeen tuloksena Ratahallintokeskuksen asettamiin materiaalivaatimuksiin implementoitujen murskattavien kiviainesten mineralogiavaatimusten täyttymistä, koska keinotekoisessa murskauksessa aines ei valikoidu heikoimmasta aineksesta vapaaksi. Toisaalta havainto johtaa väistämättä ajatukseen siitä, että ominaisuuksiltaan heikentyneitä maalajeja on menneinä vuosikymmeninä saatettu käyttää alusrakennemateriaaleina. Tällöin vedensitomis- tai routimisongelmat joillakin olemassa olevilla rataosilla saattavat johtua osittain myös eristys- välikerrosten materiaaleista. Rataverkkomme eristys- ja välikerrosten sora- ja hiekkamateriaaleja ja niiden ominaisuuksia tulisi tarkastella jatkotutkimuksissa.

Ratarakenteissa käytettävien kiviainesten mineralogiavaatimusten tehtävänä on yhtäältä varmentaa lujuuskokeisiin sidottuja kiviaineksen mekaaniselle lujuudelle asetettavia vaatimuksia ja toisaalta pyrkiä turvaamaan riittävä varmuus merkittävän rakenteessa tapahtuvan kemiallisen rapautumisen poissulkemiseksi. Seuraavassa esitetään raidesepelikiviaineksen mineraalikoostumuksen laatuvaatimuksiin implementoidut (Ratahallintokeskus, 2005) yleistetyt vaatimukset, joista poikkeaminen edellyttää kiviaineskohtaisia lisäperusteluja esimerkiksi kiviaineksen rakenteesta tai mineraalien edullisesta yhteenliittymistavasta. Pääpiirteissään kyseisiä yleisiä vaatimuksia suositellaan sovellettavaksi myös eristys-välikerrosmurskeiden suhteen.

Raidesepeli ei saa sisältää haitallisissa määrin sähköä johtavia mineraaleja. Rapautumisherkkiä opaakkimineraaleja (sulfideja, kiisuja, oksideja tai grafiittia) kiviaines saa sisältää enintään 3 prosenttia. Jos opaakkimineraalit voidaan malmimikroskooppisin tutkimuksin varmuudella todeta oksideiksi, voidaan niitä sallia enintään 5 prosenttia. Pehmeiden rapautumis- ja muuttumistuotteiden (esimerkiksi kloriitti ja talkki) yhteenlaskettu osuus raidesepelikiviaineksessa ei saa ylittää 5 prosenttia. Helposti liukenevia ja murenevia karbonaattimineraaleja (kalsiitti, dolomiitti) ei saa kasaumina olla 5 prosenttia enempää, hajallaan korkeintaan 10 prosenttia. Muiden pehmeiden mineraalien, erityisesti kiilteiden, sekä kaikkien edellä mainittujen mineraalien yhteenlaskettu osuus ei saa ylittää 20 prosenttia. Jos kiille esiintyy pakkoina tai muunlaisina suuntautuneina kasaumina, sen osuus kiviaineksen mineraalikoostumuksessa saa olla enintään 15 prosenttia.

Lisäksi myös rapautumisalttiutta osaltaan kuvaavana jäätymis-sulamiskestävyyden esivalintatestinä suositellaan käytettäväksi veden absorptiokoetta (SFS-EN 1097-6). Sen soveltamista tukee myös routanousukokeissa saadut havainnot, joiden mukaan karkeiden partikkeleiden suuri vedenimu lisää materiaalin routimisherkkyyttä. *Eristys- ja välikerrosten kalliomurskeilla vedenimeytymisen enimmäismäärälle suositellaan lajitteesta 4/31.5 mm määritettynä (SFS-EN 1097-6: luku 8) arvoa 0.5 % (luokka WA₂₄0.5).* Mikäli kyseinen suositus ei täyty, kiviaineksen ominaisuuksia suositellaan tutkittavaksi tarkemmin esimerkiksi jäädytys-sulatus- ja routanousukokeissa.

Hienoaineksen sisällä raekokojakautuma kaikissa tukikerrosnäytteissä ja uusissa kalliomurskeissa oli keskenään hyvin samantyyppinen. Joissakin tapauksissa kuivaseulonnassa karkeampien rakeiden pinnoilta irtoamattoman hienoaineksen määrä oli merkittävä ja aines laadultaan kuivaseulonnassa irronneeseen ainekseen nähden poikkeavaa. Huomiota herättävän suuri merkitys tukikerrosnäytteiden hienoainesten muihin ominaisuuksiin oli niiden humuspitoisuudella. Vuosikymmenten aikana tukikerrokseen kerääntyvään orgaaniseen ainekseen tulee kiinnittää jatkotutkimuksissa erityistä huomiota. Hehikutushäviö käytännössä määräsi näytteen veden adsorption ja sillä oli selvä yhteys myös ominaispinta-alaan ja adsorptiohuokosten tilavuuteen. Huomattavaa oli myös joidenkin tukikerrosnäytteiden jopa erittäin suurten ominaispinta-alojen pieneneminen hehikutuksen jälkeen mineraalisten maa-ainesten normaalitasolle. Kiviperäisen mineraalisen aineksen ominaisuudet peittyivät useissa tapauksissa humuksen vaikutusten taakse. Tarkastelun ongelmallisuutta lisää se, että humukseen sitoutuneen veden vaikutukset esimerkiksi routivuuteen on havaittu erilaisiksi kuin mineraaliseen ainekseen sitoutuneen veden vaikutukset.

Tarkasteltujen tukikerrosnäytteiden *mineraalisten* hienoainesten ominaisuudet poikkesivat yleisessä tapauksessa suhteellisen vähän toisistaan. Yleisessä tapauksessa tukikerrosmateriaalin hienoaineksen vaikutuksia voidaan siten suurelta osin arvioida sen määrän perusteella. Luonnon lajittelemien materiaalien osalta ominaisuuksien hajonta oli voimakkaasti suurempaa, mistä syystä niiden suhteen myös hienoaineksen laadullisten ominaisuuksien tarkastelu on tärkeää. Yksittäisten poikkeavien tukikerrosnäytteiden selvittämiseksi tarvitaan eri koemenetelmillä saatujen tulosten kokonaisarviointia. Rakeisuusmäärittäminen, vedenimu, mineraloginen tarkastelu sekä hienoaineksen ominaispinta-ala, veden adsorptio, humuspitoisuus ja huokoskokojakautuma muodostavat hyvän tutkimuskokonaisuuden poikkeavien näytteiden ja poikkeamien syiden tunnistamiseksi. Tehtyjen kokeiden tulokset ominaisuuksien keskimääräisistä arvoista ja vaihteluväleistä (taulukko 7.1) tarjoavat hyvän vertailuaineiston tuleville tutkimuksille.

Taulukko 7.1. Keskiarvot ja vaihteluvälit tukikerrosnäytteiden koetuloksissa. Oikeanpuoleisissa sarakkeissa tunnusluvut on esitetty jättäen huomiotta Tmj-Raa rataosan näytteet, mikäli ne ovat voimakkaasti poikenneet keskiarvosta.

	N	KESKI- ARVO	VAIHTELU- VÄLI	KESKI- ARVO ILMAN TMJ- RAA	VAIHTELU VÄLI ILMAN TMJ-RAA
VEDENIMU 4/31.5 MM (%)	26	0.20	0.08-0.80	0.16	0.08-0.28
VEDENIMU 0.063/4 MM (%)	5	0.68	0.26-1.63	0.44	0.26-0.69
JÄÄDYTYKSEN-SULATUS 4/8 MM (%)	9	1.04	0.21-4.91	0.56	0.21-0.88
JÄÄDYTYKSEN-SULATUS 8/16 MM (%)	9	0.45	0.12-2.58	0.19	0.12-0.31
KIINTOTIHEYS 4/31.5 MM (T/M ³)	26	2.83	2.63-3.03		
HIENOAINEKSESTÄ <0.02 MM (%)	36	55	42-69		
HIENOAINEKSESTÄ <0.002 MM (%)	36	11	8-17		
HEHKUTUSHÄVIÖ (%)	36	5.1	1.7-13.1	4.8	1.7-7.6
OMINAISPINTA-ALA (M ² /KG)	36	6490	2630-22220	5800	2630-13810
OMINAISPA. HEHKUTUKSEN JÄLKEEN (M ² /KG)	13	3780	2620-5830	3580	2620-5030
VEDEN ADSORPTIO (%)	36	2.82	1.39-9.23	2.61	1.39-4.50
KOKONAISHUOKOSTILAVUUS (ML/G)	32	0.509	0.427-0.655		
ADSORPTIOHUOKOSTEN TILAVUUS (ML/G)	32	0.069	0.050-0.095		
HUOKOSTEN SEINÄMIEN PINTA- ALA (M ² /G)	32	7.14	4.31-10.14		

7.2 Routanousukokeet

Kehitetyllä routanousukoelaitteistolla tarkasteltiin uusien kalliomurskeiden, tukikerroksesta hienontuneiden raidesepelikiviainesten sekä joidenkin sorien ja hiekkojen routimisherkkyyttä. Koeteknisten rajoitteiden minimoimiseksi keskeinen valinta oli paloittelun muottiputken käyttö koejärjestelyissä. Tarkastelussa lähtökohtana oli arvioida kiviainesten sisältämän hienoainesten määrän ja toisaalta partikkulien laadullisten ominaisuuksien vaikutusta routimisherkkyyteen. Routimisherkkyyttä kuvaavina kokeen tulospaareina tarkasteltiin routanousuja, routimiskertoimia, routanoususuhteita ja routanousunopeuksia. Routimiskerroin viittaa segregatiopotentiali-käsitteeseen.

Routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien virherajoja tarkasteltiin keskihajonnan ja keskiarvon suhteena, eli variaatiokertoimina. Yksittäisessä kokeessa saavutettavien routimisherkkyyttä kuvaavien parametrien virherajoiksi arvioitiin noin ± 25 %. Routimiskertoimien osalta hajonta oli suurempaa kuin esimerkiksi routanousuilla, mutta toisaalta routimiskerroin (tai segregatiopotentiali) on yleisimmin hyväksytty pelkästään tarkasteltavan materiaalin routimisherkkyyttä kuvaamaan pyrkivä parametri. Muut kokeen tulospaareit ovat periaatteiltaan enemmän koeolosuhteista riippuvia ja siten kansainvälisesti standardoidun routanousukoejärjestelyjen puuttuessa eri järjestelyissä saavutetut tulokset ovat huonosti keskenään vertailtavissa. Merkittävä epävarmuus routimiskertoimen määrittämisessä on seurausta routanousun etenemisen pysähtymisvaiheen määrittämisen epätarkkuudesta, sillä routimiskerroin vaihtelee voimakkaasti kokeen edetessä ja varsinainen parametrien arvo tulisi määrittää juuri

kyseisellä hetkellä vaikuttavana arvona. Varsinaiseen routimiskertoimeen verrattuna kokeen jäädytysvaiheesta 12 ja 24 tunnin väliltä määritetyn keskimääräisen routimiskertoimen vaihtelu oli vähäisempää ja toisaalta sen korrelaatio muihin tulosparametreihin oli parempi.

Kiviaineksen routimattomuuden käsite on lähinnä teoreettinen, sillä monissa käytännössä yleisesti routimattomina pidetyissä materiaaleissa esiintyi vähäistä routimisilmiötä. Siksi tärkeämpää olisi käsitellä käytännöllisen routimattomuuden käsitettä. Käytännöllisen routimattomuuden rajojen määrittäminen edellyttäisi kenttähavaintoja, mutta niiden puuttuessa tutkimusten tuloksena ratarakenteessa ehdotetaan sovellettavaksi käytännöllisen routimattomuuden rajoina routimiskerrointa $1.0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ ja kuvatuissa koejärjestelyissä saavutettua neljän vuorokauden jälkeistä routanousua 2.2 mm . Kalliomurskeiden sisältämiin hienoainespitoisuuksiin pohjautuvissa routanousumalleissa ehdotetut rajat vastasivat noin 1.5% pitoisuutta alle 0.02 mm ainesta. Tukikerrosnäytteiden hienoainesten sisäisten partikkelikokojakaumien perusteella tämä vastasi keskimäärin noin 2.7% hienoainespitoisuutta ($\% < 0.063 \text{ mm}$).

Tietyn kalliomurskekiviaineksen routimisherkkyyys havaittiin tarkastelluilla alle 15% hienoainespitoisuuksilla käytännössä lineaarisesti riippuvaksi sisältämänsä hienoaineksen määrästä. Eri murskelaaduilla routimisherkkyyden ja hienoainemäärän välinen yhteys asettui lievästi eri tasoille. Tasoterot olivat vähäisempiä, kun huomioitiin eri kiviainesten hienoainesten sisäisen raekokojakautuman erot ja tarkasteltiin routimisherkkyyttä alle 0.02 mm tai alle 0.002 mm aineksen määrän suhteen. Siten voitiin selvästi havaita, että routimisherkkyyys riippuu ennen muuta hienoaineksen kaikkein hienoimmista partikkeleista.

Hienoaineksen hienoimpien partikkeleiden osuus kiviaineksessa korreloi routimisherkkyyteen tarkastelluissa kalliomurskeissa varsin hyvin. Tarkastelluissa kalliomurskeissa mineraalisen hienoaineksen erot olivat kuitenkin vähäisiä verrattuna sorien ja hiekkojen hienoaineksiin. Kalliomurskepartikkelien pintarakenne oli yleisellä tasolla selvästi parempikuntoista joidenkin sorien pintarakenteeseen verrattuna. Näin ollen etenkin kalliomurskeiden sekä sorien ja hiekkojen yhdistetyssä tarkastelussa korrelaatioita routimisherkkyyteen voitiin selvästi parantaa liittämällä hienoainelajitteiden määrän ohella tarkasteluun selittäviksi muuttujiksi kiviainespartikkeleiden ja hienoaineksen laadullisia ominaisuuksia kuvaavia parametreja. Tarkastelluista partikkeliominaisuuksista parhaiten routimisherkkyyteen korreloi karkeiden partikkelien vedenimu sekä hienoaineksen kokonaishuokostilavuus. Hienoaineksen veden adsorption ja ominaispinta-alan osalta vaikutusten tarkastelua sekoitti ominaisuuksien arvot suurelta osin määrännyt tukikerrosnäytteiden sisältämä humusaines. Askeltavan regressioanalyysin tuloksena alle 0.002 mm aineksen määrä, karkeiden partikkelien vedenimu ja hienoaineksen kokonaishuokostilavuus selittivät routimisherkkyyttä kiviainesten yhteistarkastelussa miltei yhtä hyvin kuin hienoaineksen määrä yksittäisten kiviainesten erillistarkasteluissa.

Joidenkin sora- ja hiekkamateriaalien selvästi kalliomurskeista poikenneet huokoisuus- ja vedensitomisoimisominaisuudet ilmentävät niiden lievää rapautuneisuutta. Karkearakeisissa luonnon lajittelemassa maalajeissa partikkeleihin vuosituhansien aikana kohdistunut ympäristörasitus on eri tasolla verrattuna kalliomurskepartikkelien muutamien murskausten jälkeisten vuosikymmenten aikana kokemaan rasitukseen.

Tässä suhteessa eristys- ja välikerrosten materiaalivalintoja ajatellen kalliomurskeiden voidaankin yleistettynä ajatella soveltuvan rakenteeseen lähtökohtaisesti rataan asennettaessa lievästi paremmin kuin *muuttuneiden* soramateriaalien. Tällöin tulee jäätikköjokien huuhtovan vaikutuksen puuttuessa kuitenkin varmistua kalliomurskeen mahdollisimman alhaisesta hienoainespitoisuudesta. Toisaalta kalliomurskeen koostumus ei ole yhtä valikoitunutta kuin luonnon lajittelemilla aineksilla, mistä syystä käyttöiän aikana tapahtuvan muuttumisen ehkäisemiseksi kalliomurske kivien mineralogiset vaatimukset on huomioitava. Havainnot soramateriaalien routimisherkkyyksien eroista puolestaan tekevät aiheelliseksi myös rakennekerrosmateriaalien routimisherkkyyden tarkastelun olemassa olevilla routimisongelmista kärsivillä rataosuuksilla.

7.3 Toistokuormituskokeet

Junakuormituksen aiheuttaman ratarakenteen kalliomurskeiden hienonemisen simuloimiseksi kehitettiin laboratoriomittakaavainen toistokuormituslaitteisto. Kehitetty järjestely mahdollisti kymmenien vuosien junaliikennettä vastaavan syklimäärän kuormittamisen muutaman viikon mittaisessa kokeessa. Laitteiston kehittämisen keskeinen lähtökohta oli mahdollistaa kiviainekseen kohdistuvan kuormitussuunnan kiertyminen todellisessa ratarakenteessa yliajavien junien aiheuttaman kuormitus-tilanteen mukaisesti. Ajatus oli kirjallisuudessa havaittuihin koejärjestelyihin nähden uusi. Kuormitussuunnan muuttuminen saatiin järjestettyä käyttämällä kolmea erillistä kuormitussylinteriä, joilla pyrittiin kuvaamaan kuormitustilannetta kolmen ratapölkyn mittaisen ratajakson alapuolella.

Ajatellen laitteiston vastaavuutta todelliseen kuormitustilanteeseen suurin epäkohta oli joissakin tilanteissa huomattavaa epätodenmukaista hienonemista aiheuttanut rajapintaongelma kiviaineksen ja kuormituslaatikon välillä. Samaan asiaan liittyy ongelmat pohjamaan käyttäytymisen kuvaamisessa. Ongelmien täydellinen ratkaisu edellyttäisi merkittävää lisäpanostusta laitteiston kehittelyyn, jossa kehitystyössä voitaisiin soveltaa Indraratna & Salim (2003) esittämää ratkaisua. Rajoitteista johtuen kuormitusjärjestelyä voidaan pitää selviä puutteita sisältävänä mallikokeena, eikä siinä saavutettuja hienonemistuloksia voida missään oloissa soveltaa absoluuttisina arvoina todelliseen ratarakenteen tilanteeseen. Tässä vaiheessa nähtiin kuitenkin laitteiston edelleen kehittämisen sijaan tarkoituksenmukaisempana vertailla eri muuttujien vaikutusta kiviaineksen hienonemiseen ja kuormituksen jakamiskykyyn kehitetyllä laitteistolla. Päätöstä tuki se, että koejärjestely oli puutteistaan huolimatta täysin uudentyypinen lähestymistapa junakuormituksen simulointiin.

Koetulosten perusteella eristys- ja välikerrosmurskeiden osalta katastrofaalisimmaksi tilanne hienonemisen suhteen muodostuu silloin, kun kiviaines on vedellä kyllästetyssä tilassa. Tällöin pahimmassa tapauksessa hienorakeinen aines kiviaineksessa joutuu veden mukana liettyneenä jatkuvaan pumppauksenomaiseen liikkeeseen karkeiden rakeiden välisessä huokostilassa. Tämän hiovan massan liikkeen seurauksena mukana liikkuva aines hienonee erittäin tehokkaasti hyvin hienojakoiseksi ainekseksi. Karkeampien rakeiden hienoneminen riippuu ennen muuta niiden hioutuvuudesta eli rakeiden kovuudesta. Havaintojen pohjalta voidaan todeta, että kalliomurskeesta rakennetun eristys- ja välikerroksen tapauksessa koko radan toimintakunnon kannalta ensisijaisen tärkeää on kuivatuksen ehdoton toimivuus.

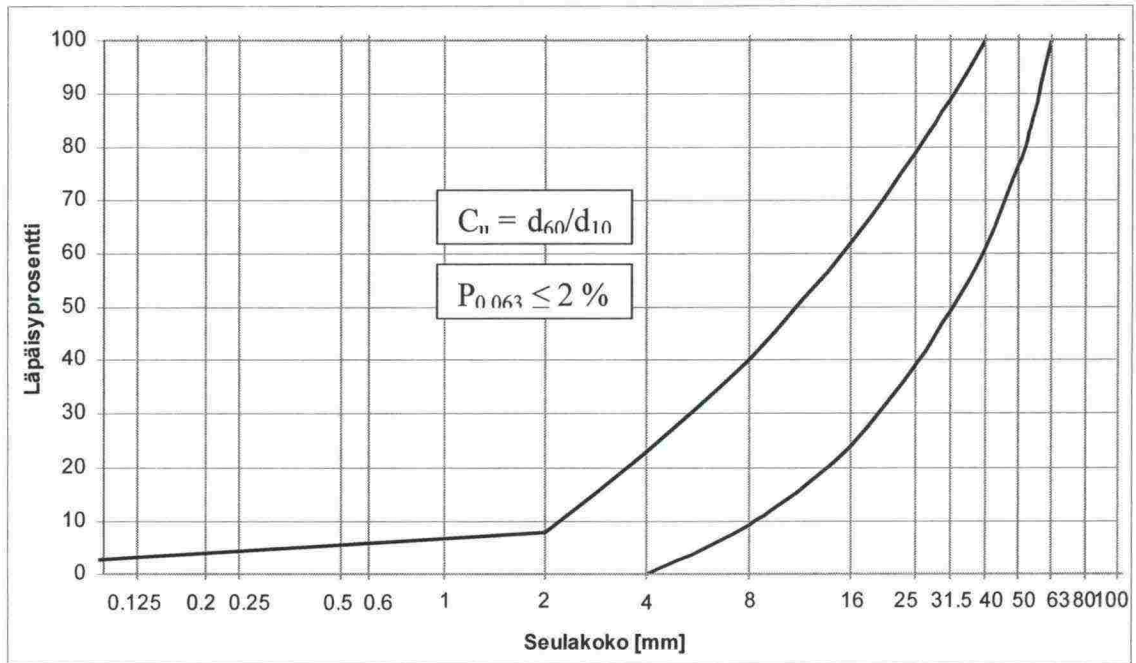
Kuivassa tai kosteassa kiviaineksessa hienoneminen oli seurausta partikkelien välisen hioutumisen ja iskeytymisen mahdollistavien liukumavyöhykkeiden muodostumisesta kiviainekseen kuormituslevyjen välisissä vertikaalitasoissa. Siirtymämittaus- ja hienonemistuloksista voitiinkin selkeästi havaita, että kiviaineksen kyky jakaa kuormitusta korreloi erittäin hyvin sen kykyyn vastustaa hienonemista. Huonosti kuormitusta jakavassa kiviaineksessa kuormituslevyn alla oleva materiaali painui kuormituksen alaisena joustavalla pohjalla jäykkänä blokkina, jonka reunoilla oli selkeät partikkeleiden väliset liukuma- ja hiertymisvyöhykkeet. Suoraan kuormituslevyjen alapuolella hienoneminen oli selvästi vähäisempää. Todellista tilannetta vääristäen kiviaines hienoni koetilanteessa myös hioutuessaan laatikon reunoja vasten.

Kokeissa käytettiin pääasiallisesti 225 kPa kuormitustasoa, jonka valinnalla varauduttiin välikerrokseen kohdistuvaa kuormitustasoa ajatellen nykyisten akselikuormien korottumiseen ja silti melko huomattavaan sysäyskertoimeen. Nykytilanteen tarkasteluun sopivampi on 150 kPa kuormitustaso, jonka voidaan todeta suuruusluokaltaan vastaavan 250 kN akselikuormasta välikerrokseen kohdistuvaa kuormitustasoa. Yleiskäsityksen saavuttamiseksi tärkeä huomio onkin se, että 150 kPa kuormitustasolla hienoneminen oli vedellä kyllästynyttä tilannetta lukuun ottamatta melko vähäistä.

Kuormitustason vaikutus oli hyvin merkittävä, sillä sen korottaminen 150 kPa:sta 225 kPa:iin lisäsi hienonemisen vertailutilanteessa 3.5–5-kertaiseksi. On toisaalta huomattava, että vertailutilanteessa kiviaineksen raekokojakautuma oli hienonemiselle altis ja toisilla raekokojakautumilla hienoneminen 225 kPa:n kuormituksella oli selvästi vähäisempää. Kuormitustason alentaminen 225 kPa:sta 150 kPa:iin vähensi hienonemista yhtä paljon kuin pohjan joustokumin ohentaminen 50 mm:stä 10 mm:iin. Kuormitustason ja pohjamaan vaikutuksia tulisi muutoinkin tarkastella yhdessä sillä ne ovat ratarakenteessa sidoksissa keskenään. Pohjamaan joustavuuden lisääntyessä akselikuormitus jakaantuu kiskon taivutusjäykkyyden ansiosta useamman ratapölkyn välityksellä, jolloin tukikerrokseen kohdistuva kuormitustaso on pienempi vain vähän joustavaan rakenteeseen verrattuna.

Kiviaineksessa tapahtuvasta kimmoisesta muodonmuutoksesta materiaalin ylimmän kolmanneksen osuus oli määräävä niissä kokeissa, joissa siirtymiä mitattiin myös kiviaineksen eri tasoilta. Tilanne oli vastaava pysyvien muodonmuutosten osalta, eli suurin osa rakeiden uudelleenjärjestäytymisestä tapahtui kiviaineksen ylimmässä kolmanneksessa.

Hienonemiseen voidaan merkittävästi vaikuttaa raekokojakautuman valinnalla. Tasarakeisimman materiaalin (4/32 mm) hienoneminen oli selvästi voimakkainta. Raekokojakautuman laajentaminen vähensi hienonemista selvästi. Mielenkiintoista oli se, että alun perin hienorakeista ainesta sisältämätön 4/32 mm kiviaines hienontui niin voimakkaasti, että sen hienoainespitoisuus oli kokeen jälkeen suurempi kuin raekokojakautuman 0/50 mm kiviaineksessa, joka sisälsi kokeen alussa 13 % alle 4 mm ainesta. Raekokojakautuman valinta on kustannuksiltaan olematon keino hienonemisen merkittävään rajoittamiseen. Tutkimusten perusteella eristys- ja välikerrosmurskeen rakeisuudelle esitetään kuvan 7.1 mukainen suositus.



Kuva 7.1. Suositus eristys- ja välikerrosmurskeen rakeisuudelle.

Myös kiviaineksen lujuuden havaittiin vaikuttavan hienonemiseen. Kuivana tehdyissä kokeissa hienoneminen korreloi iskunkestävyyttä kuvaavien testitulosten, haurausarvon ja Los Angeles-luvun kanssa. Vedellä kyllästetyssä tilassa kiviaineksen hioutuvuus (kuulamylyarvo ja micro-Deval) oli lujuusparametreista ratkaiseva. Siten molempien ominaisuuksien sisällyttäminen kiviainekselle asetettaviin vaatimuksiin on perusteltua.

Koetulosten sekä kuulamyly- ja haurausarvokokeiden tuloksiin sidottujen olemassa olevien lujuusvaatimusten perusteella eristys- ja välikerrosmurskeen lujuudelle esitetään EN-standardin (SFS-EN 13242) mukaisiin testimenetelmiin sidotut suositukset (taulukko 7.2). Havaintojen perusteella eristyskerroksen alaosassa vaikuttavilla alhaisemmilla kuormitustasoilla voidaan sallia käytettäväksi heikompaa kiviainesta kuin välittömästi tukikerroksen alapuolella. Lisäksi on huomioitava edellä esitetyt kiviaineksen mineralogiasuositukset.

Taulukko 7.2. Suositukset eristys- ja välikerrosmurskeiden lujuudelle.

		Los Angeles luokka (SFS-EN 1097-2)		micro-Deval luokka (SFS-EN 1097-1)	
		Suosittel- tava	Alin mahdollinen erityisperustein	Suosittel- tava	Alin mahdollinen erityisperustein
Tason yläpuolella	Kv-1500mm	LA ₂₅	LA ₃₀	MD ₁₅ ^{*)}	MD ₁₅ ^{*)} (MD ₂₀)
Tason alapuolella	Kv-1500mm	LA ₃₀	LA ₃₅	MD ₂₀	MD ₂₀

^{*)} SFS-EN 13242:n mahdollistamat MD-luokat ylittävä vaatimus

Eristys- ja välikerrosmurskeista irrallisena, mutta tukikerrokseen määräävästi vaikuttavana tekijänä tarkasteltiin tukemisen simuloimiseksi tehtyä järjestelyä, joka lisäsi hienonemista dramaattisesti. Yksitoista kertaa kokeen kuluessa toistetun

tukemissimulaation seurauksena kiviaineksen hienoneminen kokeessa oli voimakkaampaa kuin missään muussa kokeessa, vaikka ilman tukemissimulaatiota vastaava koe ei hienontanut kiviainesta käytännössä lainkaan. Tulos vahvistaa aiempien tutkimusten havaintoja tukemisen erittäin merkittävästä vaikutuksesta raidesepelin hienonemiseen. Kiviaines hienonee tukemishakkujen iskujen välittömän vaikutuksen lisäksi tukikerroksen sekoittumisen seurauksena tapahtuvan rakeiden uudelleenjärjestäytymisen johdosta. Kirjallisuushavaintojen perusteella 'stoneblowing' tarjoaa raidesepelille huomattavasti hellävaraisemman menetelmän raiteen aseman korjausmenetelmän.

Kokeissa havaittujen hienonemistulosten lukuarvojen suora yleistäminen ei ole kuormitusjärjestelyn ja todellisen tilanteen eroavaisuuksien vuoksi mahdollista. Tästä syystä todellisessa rakenteessa tapahtuvan hienonemisen voimakkuutta yleisessä tapauksessa voidaan eri koeolosuhteissa saavutettujen tulosten pohjalta ainoastaan arvioida. On huomattava, että pääosassa kokeista käytetyssä 225 kPa kuormitustasossa on nykyisiä akselikuormia ajatellen huomattavasti varmuutta. *Nykytiedon valossa kokeiden perusteella muotoutuneena yleiskäsityksenä voidaan arvioida epätodennäköiseksi, että eristys- ja välikerroksen murske kuivatuksen toimiessa yleisessä tapauksessa hienonee joidenkin satojen miljoonien bruttotonniin junakuormituksen vaikutuksesta rakenteen toimintaa merkittävästi haittaavissa määrin silloin, kun käytetään asetetut vaatimukset täyttävää kiviainesta.* Arvio pätee nykyisillä ja lievästi korotetuilla akselikuormituksilla.

8 PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET

8.1 Primaariset päätelmät

8.1.1 Kalliomurskeiden hienoneminen

Raidesepelin hienoneminen Suomen rataverkolla on suurelta osin seurausta sepeli-rakeiden mekaanisesta murtumisesta ja hioutumisesta liikennekuormituksen ja tukemisen vaikutuksesta.

Murskauksen jälkeinen kemiallinen rapautuminen Suomen rataverkolla käytetyissä raidesepeleissä on yleensä merkityksettömän vähäistä ja esiintyessäänkin suurelta osin rakeiden pinnoille rajoittunutta.

Tukemisen merkitys raidesepeliä hienontavana tekijänä on erittäin suuri.

Eristys- ja välikerroksissa käytettävän kalliokiviaineksen lujuudelle, mineralogialle ja rakeisuudelle esitettiin tutkimusten perusteella suositukset. Eristyskerroksen pohjalla vaatimus kiviaineksen lujuudelle on vähäisempi kuin välittömästi tukikerroksen alapuolella.

Käytettäessä esitettyjen suositusten mukaista kalliomursketta sen hienoneminen eristys- ja välikerroksissa rakenteen toimintakykyä ratkaisevasti heikentävällä tavalla arvioitiin joidenkin satojen miljoonien bruttotonniin junakuormituksen vaikutuksesta epätodennäköiseksi nykyisillä ja lievästi korotetuilla akselikuormituksilla. Tämän edellytyksenä on, että rakenteen kuivatus on toimiva.

Vedellä kyllästetyssä tilassa kalliomurskeen hienoneminen toistokuormituksessa oli dramaattisen voimakasta. Siksi radan kuivatuksen toimivuus on ensisijaisen tärkeää murskatun kalliokiviaineksen hienonemisen ehkäisemiseksi.

8.1.2 Routimisherkkyyden arviointi

Tietyissä kalliomurskeissa routimisherkkyyys oli tarkastelluilla alle 15 % hienoaines-pitoisuuksilla suoraan verrannollinen sisältämäänsä hienoainespitoisuuteen.

Eri kalliomurskeiden yhteistarkastelussa routimisherkkyyys korreloi hienoaines-pitoisuutta paremmin hienoaineksen hienoimpien lajitteiden, alle 0.02 mm ja alle 0.002 mm, osuuksiin.

Mineraalisten partikkeleiden pintaominaisuuksien vaihtelu kalliomurskeissa oli muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta suhteellisen vähäistä. Hienoaineksen vaikutusta tukikerroksen toimintaan voidaan siten suurelta osin arvioida sen määrän perusteella. Esitetyt testimenetelmät tarjoavat menettelyn poikkeavien hienoaineslaatujen havainnointiin.

Joidenkin sora- ja hiekkamateriaalien selvästi kalliomurskeista epäedullisempaan suuntaan poikenneet huokoisuus- ja vedensitomisoimaisuudet ilmensivät niiden rapautuneisuutta ja aiheuttivat kiviainesten poikkeavan suuren routimisherkkyyden.

Tarkastelluista partikkeleiden laadullisista ominaisuuksista parhaiten routimisherkkyyteen korreloivat karkeiden partikkelien vedenimu ja hienoaineksen kokonaishuokostilavuus.

Alle 0.002 mm aineksen osuuteen, karkeiden partikkelien vedenimuun ja hienoaineksen kokonaishuokostilavuuteen perustuva regressiomalli selitti routimisherkkyyttä kiviainesten yhteistarkastelussa miltei yhtä hyvin kuin hienoaineksen määrä yksittäisten kiviainesten erillistarkasteluissa.

8.2 Yksityiskohtaiset päätelmät

8.2.1 Tukikerrosnäytteiden ja routimisherkkyyden tarkastelu

Rakeisuusluku ($P_{25\text{mm}}+P_{8\text{mm}}+P_{1\text{mm}}$) paremmin raidesepelin hienontuneisuuden arviointiin soveltuu alkuperäisestä raekokajakautumasta vähemmän riippuva rakeisuusparametri $P_{8\text{mm}}+P_{1\text{mm}}$, jota tulee tarkastella tietyllä rataosalla keskimäärin. Rakeisuuslukuun sidottua teoreettista puhdistusrajaa ($P_{25\text{mm}}+P_{8\text{mm}}+P_{1\text{mm}} = 88$) vastaa arvo $P_{8\text{mm}}+P_{1\text{mm}} = 35$. Elinkaaritaloudellisinta puhdistusrajaa tulisi kuitenkin pyrkiä jatkossa tarkastelemaan raidegeometrian mitattujen poikkeamien ja niitä vastaavien tukikerroksen ominaisuuksien perusteella.

Raidesepelin toimintakykyä arvioitaessa näytteenottotason valinnassa tulee huomioida toisaalta hienoaineksen korkeustasosta riippumaton vahingollisuus ajatellen veden pidättymistä ja routimisherkkyyttä sekä toisaalta muodonmuutosominaisuuksien ja raiteen tuettavuuden turvaamiseksi edellytetty huokostila etenkin tukikerroksen yläosissa. Sydännäytekairalla olisi mahdollista ottaa alusrakennekerrokseen saakka ulottuva näyte.

Syynä eräässä kohteessa tapahtuneeseen tuhansien betoniratapölkkyjen murtumiseen havaittiin yhdessä riittämättömän tukikerrospaksuuden kanssa olleen raidesepelin epätasainen hienoneminen, joka oli kiskoja alapuolella ja pölkkyjen päissä voimakasta, mutta raiteen keskellä vähäistä.

Tukikerrokseen vuosikymmeninen kuluessa kerääntyvällä humuksella oli hyvin suuri merkitys materiaalin sisältämän hienoaineksen veden adsorptioon. Tästä huolimatta hienoaineksen hehikutushäviö ei tarkentanut hienoainesmäärään perustuvaa routimisherkkyyssarviota, samoin kuin ei myöskään hienoaineksen veden adsorptio tai ominaispinta-ala.

Joidenkin tukikerrosnäytteiden hienoaineksista ennen hehikutusta määritetyt hyvin suuret ominaispinta-alat pienenevät hehikutuksen jälkeen mineraalisten maa-ainesten normaalitasolle. Suhteellisen pienistä hehikutushäviöistä huolimatta humuksen vaikutus joihinkin hienoainesten ominaisuuksiin oli määräävä.

Tukikerrosnäytteiden hienoaineksista kovat kivimineraalit; kvartsi, maasälvät ja amfibolit, muodostivat keskimäärin 80 % hienontuneiden tukikerrosnäytteiden hienoaineksesta, mikä ilmentää niiden vastuskykyä kemialliselle rapautumiselle myös hienoaineksena esiintyessään.

Joidenkin tarkasteltujen sora- ja hiekkamateriaalien rapautuneisuus ja poikkeuksellisen voimakas routimisherkkyyys tekevät aiheelliseksi myös eristys- ja välikerros-materiaaleina käytettyjen sorien ja hiekkojen routimisherkkyyden tarkastelun olemassa olevilla routimisongelmista kärsivillä rataosuuksilla.

Radan rakennekerrosmateriaalien *käytännöllisen routimattomuuden* rajana suositellaan käytettäväksi kuvatuissa testiolosuhteissa saavutettua routimiskerrointa 1.0 mm/Kh ja neljän vuorokauden jälkeistä routanousua 2.2 mm. Hienoaineksen määrään perustuvan routanousumallin ($R^2=0.62$) nojalla em. rajoja vastasi alle 0.02 mm aineksen 1.5 % pitoisuus. Tyypillisessä kalliomurskeessa tämä vastasi 2.7 % hienoainespitoisuutta ($\%<0.063$ mm).

8.2.2 Toistokuormituskokeet

Kehitetyssä kolmen erillisen kuormituslevyn toistokuormituslaitteistossa tiettyyn partikkeliryhmään kohdistuvan suurimman pääjännityssuunnan kiertymisen mahdollistaminen oli kirjallisuudessa esitettyihin koejärjestelyihin nähden uusi näkökanta, mutta olennaista *liikkuvan* pyöräkuorman simuloimiseksi. Suurimmat koejärjestelyn epäkohdat ratarakenteen kuormitusympäristön simuloimisessa liittyvät koestuslaatikon jäykkiin seinämiin.

Toistokuormituskokeissa todettiin, että kiviaineksen kyky jakaa kuormitusta korreloi erittäin hyvin sen kykyyn vastustaa hienonemista.

Kiviaineksen rakeisuudella oli merkittävä vaikutus toistokuormituskokeissa havaittuun hienonemiseen. Tasarakeisen kiviaineksen hienoneminen oli selvästi suurempaa suhteistuneempaan kiviainekseen verrattuna.

Kuivassa tilassa tehdyissä toistokuormituskokeissa hienonemiseen korreloi kiviaineksen lujuusominaisuuksista lähinnä iskunkestävyyttä kuvaavien testien tulokset ja vastaavasti vedellä kyllästetyssä tilassa hioutuvuuden kestävyyttä kuvaavat testitulokset.

8.3 Jatkotutkimussuositukset

Stoneblowing menetelmän käyttöedellytyksiä tukemiselle vaihtoehtoisena kunnossapitomenetelmänä Suomessa tulisi selvittää.

Huokosilman luontaisesta konvektiosta ja tuulen aiheuttamasta pakotetusta konvektiosta seuraavan rakenteen jäätymisen nopeutumisen poisrajaaminen edellyttää oikeita materiaaalivalintoja, joista varmistumiseksi ilmiöitä tulisi tutkia kokeellisesti ja laajennetussa teoreettisessa tarkastelussa.

Joidenkin tarkasteltujen soramateriaalien selvästä routimisherkkyydestä johtuen eristys- ja välikerroksissa käytettyjen sora- ja hiekkamateriaalien ominaisuuksia ja routimisherkkyyttä tulisi tutkia etenkin routimisongelmista kärsiville rataosuuksille kohdennettuna.

Laitteistokehittelyä radan rakennekerrokseen kohdistuvan liikennekuormituksen simuloimiseksi tulisi jatkaa mahdollistamalla koestuslaatikon seinämien horisontaali-

suuntainen liike voimaohjatusti. Myös pohjamaan simulointia tulisi kehittää. Kehittelyn perimmäisenä tavoitteena tulee olla saatavien absoluuttisten tulosten sovellettavuus todelliseen rakenteeseen. Tämä mahdollistaisi materiaali- ja kunnossapitovalintoja koskevien elinkaaritaloudellisten vertailujen tekemisen.

Raidesepelin taloudellisen puhdistusrajan arvioimiseksi tulisi tarkastella raidegeometrian mittausdataa ja sitä vastaavan raidesepelin ominaisuuksia yhdessä. Pyrkimyksenä tulisi olla geometriavirheiden ja niiden toistuvuuden liittäminen raidesepelin ominaisuuksiin.

Sepelikiviaineksen laadusta riippumattomien rakenteellisten ja ympäristöön liittyvien tekijöiden vaikutusta raidesepelin hienontumisessa tulisi tutkia. Huomiota tulisi kiinnittää myös orgaanisen aineksen ja siihen sitoutuvan veden vaikutuksiin.

Sydännäytekairan käyttöä raidesepelin (ja alempien rakennekerrosten) näytteenotto-menetelmänä tulisi edistää. Tutkimusta koskien maatutkauksen käyttöä sepelilaadun arvioinnissa tulisi edelleen jatkaa.

LÄHDELUETTELO

Casagrande, A. (1932). A new theory of frost heaving: discussion. Highway Research Board, Proceedings of Annual Meeting. Vol 11, pp. 168-172.

GLO-85 (1985). Geotekniset laboratorio-ohjeet. I luokituskokeet. Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. Helsinki. Rakentajain Kustannus Oy.

Indraratna, B. & Salim, W. (2003). Deformation and degradation mechanics of recycled ballast stabilised with geosynthetics. Soils and Foundations. Vol. 43, No. 4, pp. 35-46.

ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering) Technical Committee on Frost, TC-8 (1989). Work report 1985-1989. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, Finland, 13-15.3.1989. Espoo, VTT. Vol 1, pp. 15-70.

Ito, Y., Vinson, T.S., Nixon, J.F. & Stewart, D. (1998). An Improved step freezing test to determine segregation potential. Proceedings of the 7th International Permafrost Conference, Yellowknife, Canada, June 23-27, pp. 509-516.

Konrad, J.-M. (1980). Frost heave mechanics. Ph.D. Thesis. Edmonton, University of Alberta. 405 p., 67 app.

Konrad, J.-M. (1999). Frost susceptibility related to soil index properties. Canadian Geotechnical Journal. Vol 36, pp. 403-417.

Konrad, J.-M. & Lemieux, N. (2005). Influence of fines on frost heave characteristics of well-graded base-course material. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 42, pp. 515-527.

Koskinen, J. (1998). Tiedonkeruu ja käsittely routanousukokeessa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. 58 s.

Kujala, K. (1991). Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils. PhD thesis. ACTA Universitatis Ouluensis Series C 58. 99 p., 5 app.

Momoya, Y. & Sekine, E. (2005). Deformation characteristics of railway asphalt roadbed under moving wheel load. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, September 12-16 2005, pp. 1757-1760.

Nieminen, P. (1985). Moreenin hienoaineksen laatu ja sen vaikutus routimisherkkyyteen. Väitöskirja. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisuja 34. 92 s., 12 liites.

Nurmikolu, A. (2000). Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus Tekninen yksikkö. 93 s., 34 liites.

Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa; Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Helsinki, Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. 193 s.

Nurmikolu, A., Uusinoka, R., Niskanen, P., Kuula-Väisänen, P. (2001). Effects of aggregate strength on the life cycle of railway ballast. Proceedings of Aggregate 2001 – Environment and Economy, Helsinki, 6-10 August 2001. Vol. 1, pp. 213-218.

Onninen, H. (2001). Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratorioissa. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 6, Espoo. 11 s.

PANK-2108:1997. Kiviainekset, veden adsorptio. Päällystealan neuvottelukunta. 3 s.

PANK-2301:1997. Röntgendiffraktiomenetelmä. Päällystealan neuvottelukunta. 2 s.

PANK-2401:1995. Kiviainekset, ominaispinta-ala typpiadsorptiomenetelmä. Päällystealan neuvottelukunta. 2 s.

Pétursson, P. & Schouenborg, B. (2003). Frost resistance test on aggregates with and without salt (FRAS). Nordtest project no. 1624-03. 35 p.

Ratahallintokeskus (1997). Sepelitikkerroksen laadun tutkimusohje. 24.6.1997. 3 s.

Ratahallintokeskus (1999). Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL), osa 5, Maaleikkaus- ja pengerrystyöt. Helsinki, Ratahallintokeskus. 65 s.

Ratahallintokeskus (2002). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 3, Radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 31 s., 2 liitettä.

Ratahallintokeskus (2005). Raidesepelin hankinta- ja toimitusohje, Liite 2: Arvonmuutosperusteet. Uusittu 11.3.2005. 6 s.

SFS-EN 932-2:1999. Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: laboratorionäytteiden jakaminen. SFS. 12 s.

SFS-EN 932-6:1999. Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: toistettavuuden ja uusittavuuden määrittäminen. SFS. 8 s.

SFS-EN 933-1:1998. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä. SFS. 13 s.

SFS-EN 933-2:1996. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 2: Rakeisuuden määrittäminen. Seulasarjat, aukkojen nimelliskoko. SFS. 4 s.

SFS-EN 933-3+A1:2003. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku. SFS. 9 s.

SFS-EN 933-4:2003. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 4: Raemuodon määrittäminen. Muotoarvo. SFS. 8 s.

SFS-EN 1097-1+A1:2003. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Kulutuskestävyyden määrittäminen (micro-Deval). SFS. 11 s.

SFS-EN 1097-2:1998. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Iskunkestävyyden määrittämismenettelyt. SFS. 23 s.

SFS-EN 1097-6:2001. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen. SFS. 27 s.

SFS-EN 1367-1:2000. Kiviainesten lämpö- ja rapautuvuusominaisuuksien testaus. Osa 1: jäädytys-sulatuskestävyyden määrittäminen. SFS. 9 s.

SFS-EN 13242:2003. Kiviainekset sitomattomiin ja hydraulisesti sidottuihin materiaaleihin maa- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa. SFS. 35 s.

SFS-EN 13450:2003. Raideseplikiviainekset. SFS. 32 s.

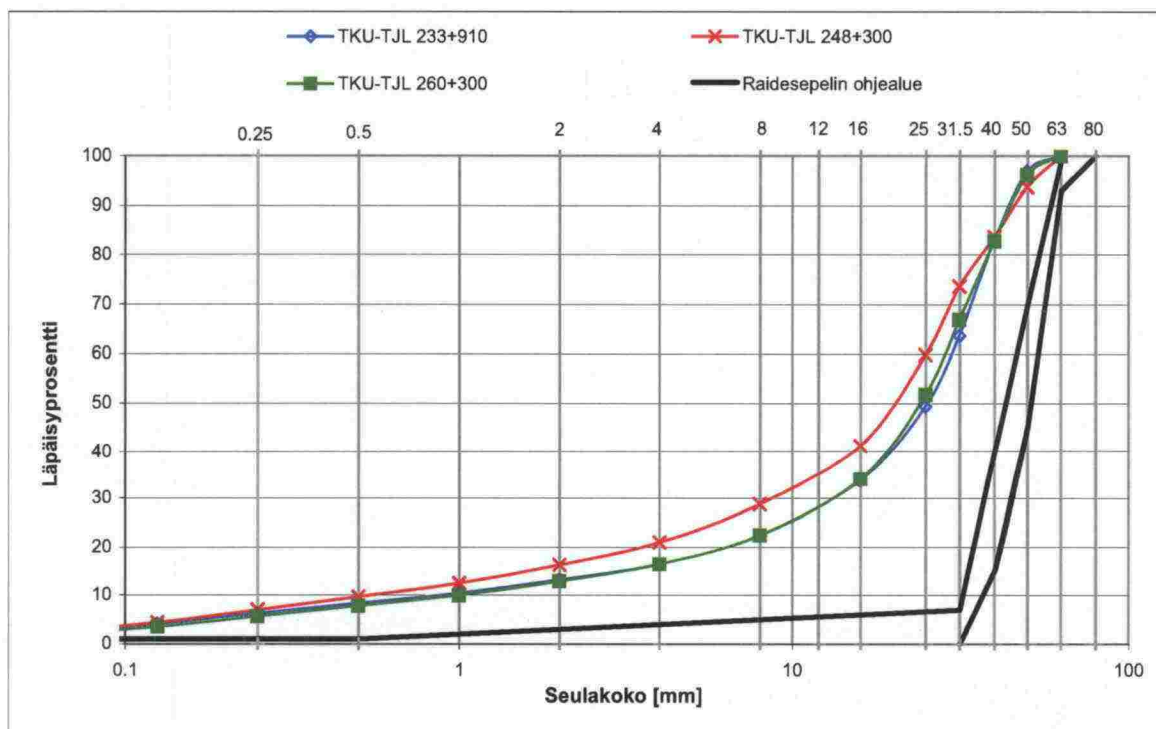
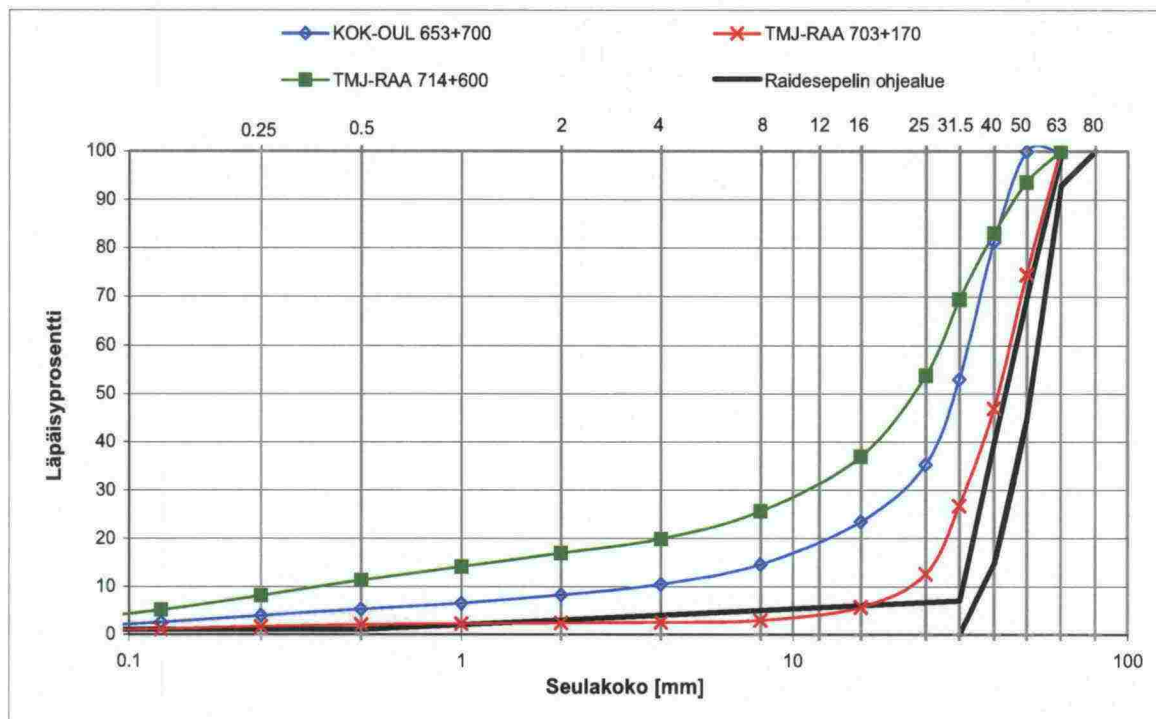
Silvast, M. & Nurmikolu, A. (2005). Radan päälly- ja alusrakenteen tutkiminen maatuokalla. *Julkaisematon*. 55 s.

Simon, R.M., Edgers, L. & Errico, J.V. (1983). Ballast and subgrade requirements study; Railroad track substructure – materials evaluation and stabilization practices. U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Report No. FRA/ORD-83/04.1. 386 p.

Uusinoka, R. (1975). A study of the composition of rock-gouge in fractures of Finnish Precambrian bedrock. *Commentationes Physico-Mathematicae*. Helsinki, Societas Scientiarum Fennica. (Ph.D. thesis). Vol. 45, No. 1, March. 101 p.

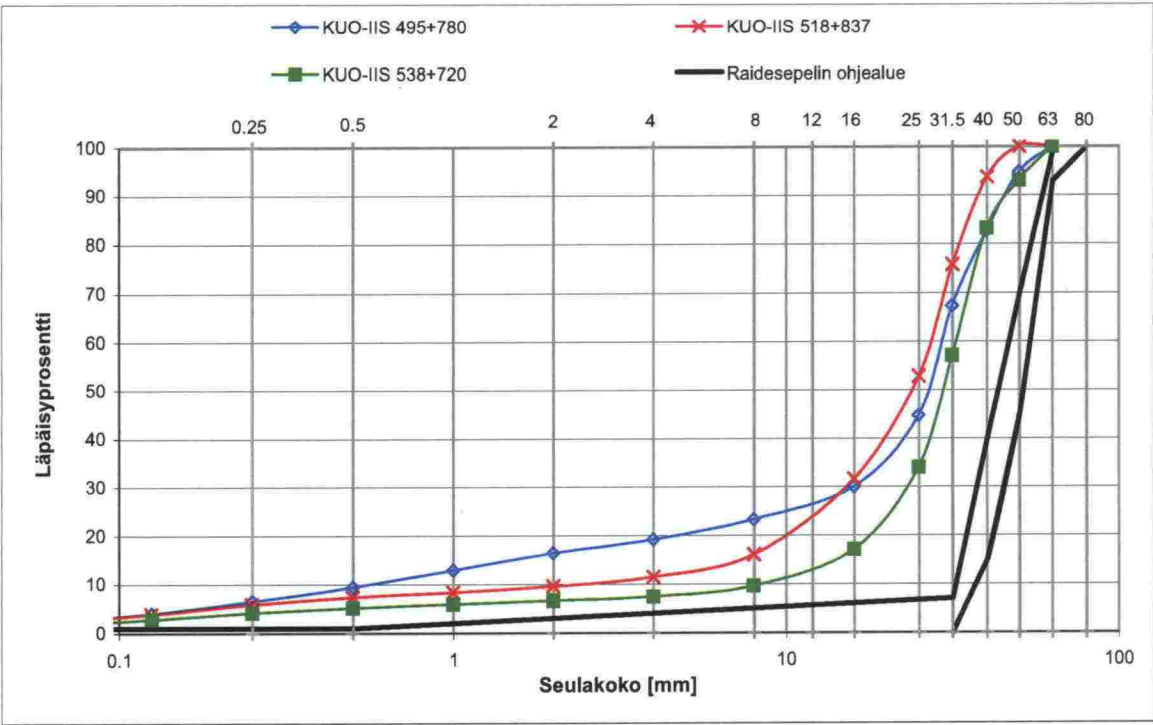
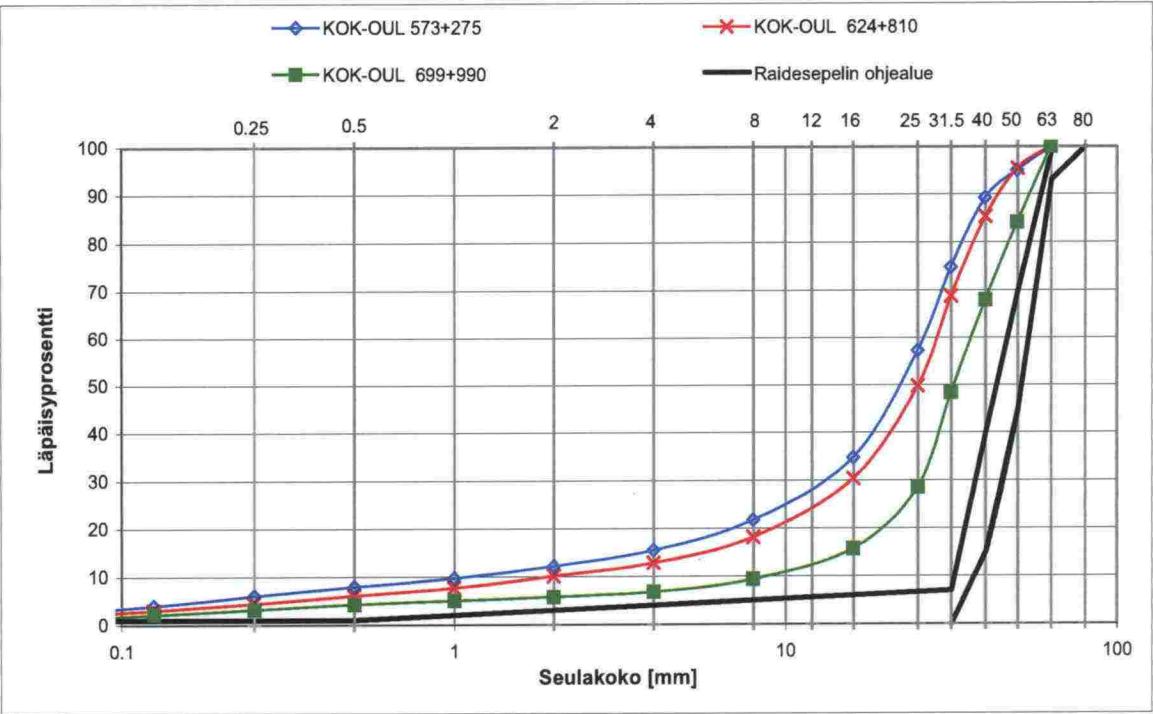
Vinson, T.S., Ahmad, F. & Rieke, R. (1987). Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils. *Transportation Research Record* 1089, pp. 124-131.

VR (1995). Raideseppelin laatuvaatimukset 1995. 30.6.1995. 30 s.



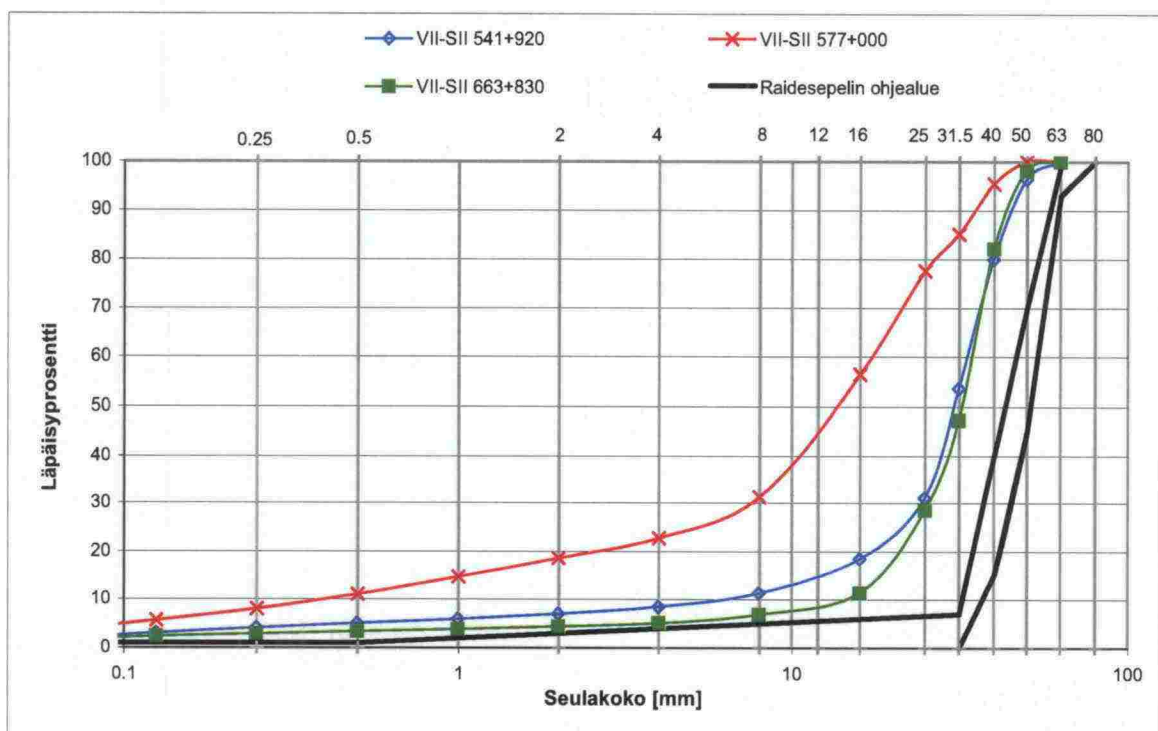
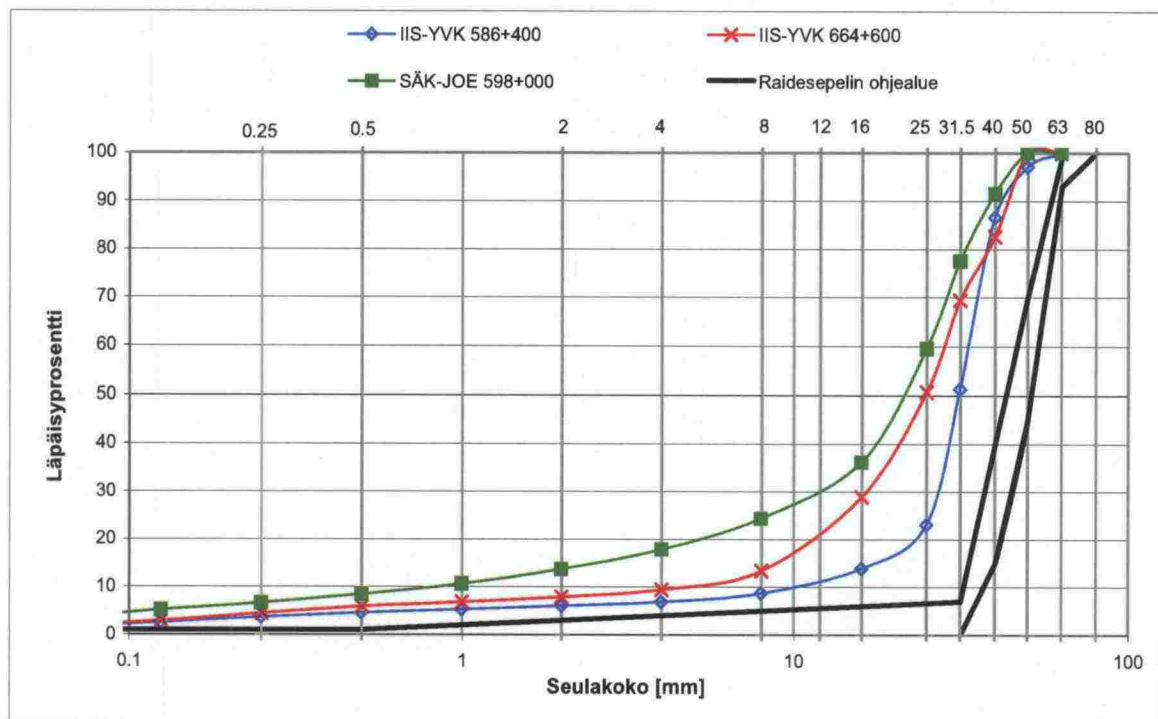
KUIVASEULONTA:

	Massa [g]	Läpäisy % 25 mm seulalla	Läpäisy % 8 mm seulalla	Läpäisy % 1 mm seulalla	Läpäisy % 0.063 mm seulalla	Rakeisuus- luku
KOK-OUL 653+700	11208	35.3	14.6	6.6	1.6	56
TMJ-RAA 703+170	9773	12.6	2.9	2.2	0.7	18
TMJ-RAA 714+600	11183	53.8	25.6	14.2	2.9	94
TKU-TJL 233+910	10687	49.5	22.5	10.4	2.5	82
TKU-TJL 248+300	12199	59.9	28.8	12.5	2.6	101
TKU-TJL 260+300	11906	51.8	22.5	10.0	2.1	84



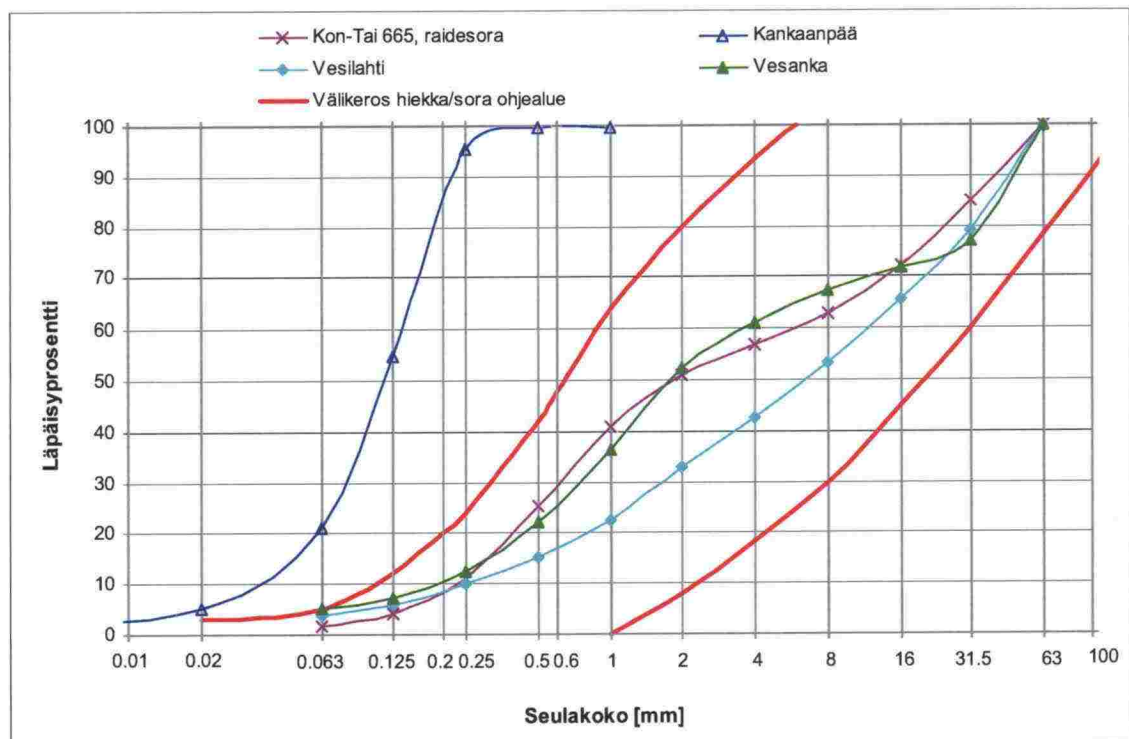
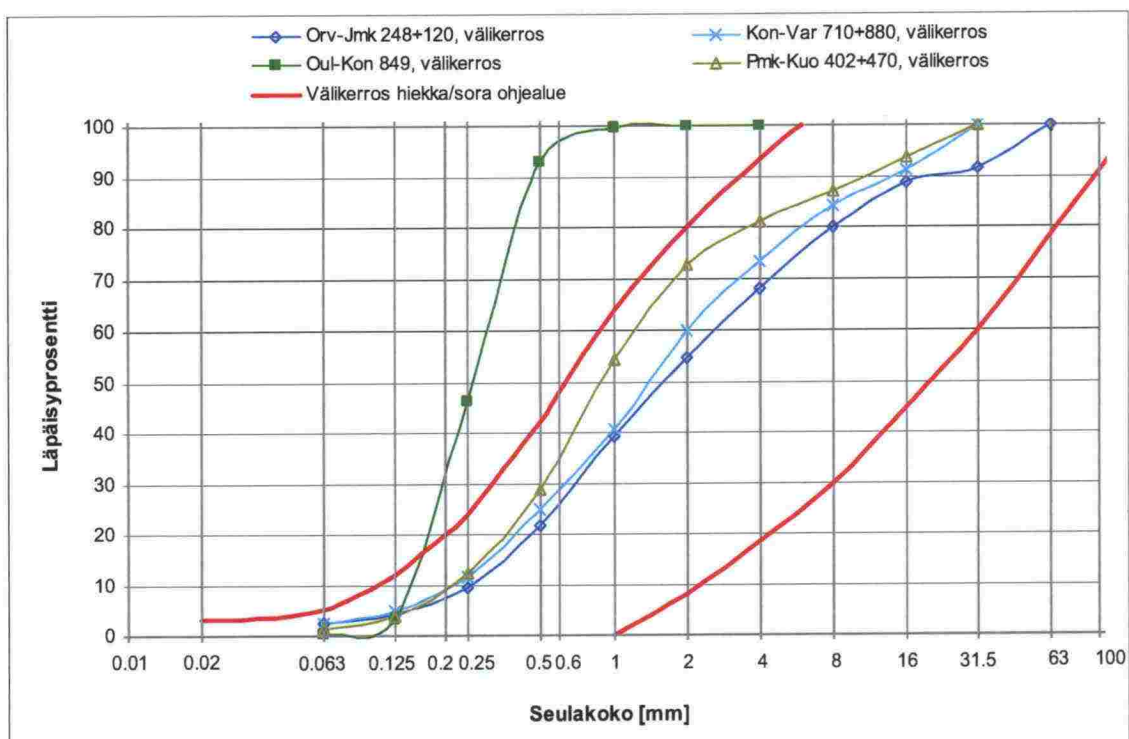
KUIVASEULONTA:

	Massa [g]	Läpäisy % 25 mm seulalla	Läpäisy % 8 mm seulalla	Läpäisy % 1 mm seulalla	Läpäisy % 0.063 mm seulalla	Rakeisuus- luku
KOK-OUL 573+275	11319	57.4	21.8	9.8	2.4	89
KOK-OUL 624+810	10741	49.8	18.2	7.7	1.8	76
KOK-OUL 699+990	11132	28.6	9.4	5.1	1.3	43
KUO-IIS 495+780	10596	44.8	23.4	13.0	2.4	81
KUO-IIS 518+837	10967	53.0	16.1	8.3	2.3	77
KUO-IIS 538+720	10492	34.1	9.6	5.9	1.7	50



KUIVASEULONTA:

	Massa [g]	Läpäisy % 25 mm seulalla	Läpäisy % 8 mm seulalla	Läpäisy % 1 mm seulalla	Läpäisy % 0.063 mm seulalla	Rakeisuus- luku
IIS-YVK 586+400	10566	23.2	8.8	5.4	1.7	37
IIS-YVK 664+600	10531	50.7	13.4	6.9	1.8	71
SÄK-JOE 598+000	10858	59.5	24.5	10.7	3.5	95
VII-SII 541+920	9834	31.1	11.4	6.1	2.0	49
VII-SII 577+000	7664	77.6	31.2	14.7	3.6	124
VII-SII 663+830	9243	28.6	7.0	3.9	1.8	39



Tampere 28.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Tor-Kol 920+180, työnumero 1891/3/7.

Tehtävä Tilaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthiemenetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Talkkipyrokсениitti

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Talkki (43,2 %), kloriitti (21,3 %), maasälvät (11,6 %), pyrokseenit (10,0 %), kvartsi (8,8 %), sarvivälke (3,3 %), biotiitti (1,8 %).

Kuvaus: Näytteen kivi on voimakkaasti muuttunut, talkkia lukuun ottamatta lähes kaikki mineraalit ovat reliikkejä. Plagioklaasia ja kalimaasälpää ei voi erottaa toisistaan voimakkaan muuttumisen vuoksi, myös pyrokseenien ja sarvivälkkeen erottaminen toisistaan on hankalaa. Lähes kaikki biotiitti on kloriittiutunut. Mineraalit ovat hyvin rikkonaisia näytteessä. Näytteessä on paljon rakoja ja mikrorakoja, joissa rakotäytteenä rautaoksidia. Näytteen mineraalien raekoko on 3-10 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Tampere 21.4.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Tmj-Raa 714-600.

Tehtävä Tilaaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthiemenetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Kiilleliuske

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Kvartsi (54,6 %), kloriitti (25,9 %), biotiitti (12,9 %), opaakki (4,4 %), muskoviitti (2,2 %).

Kuvaus: Näytteelle ominaista on mineraalien muuttuminen; kiilteet ovat voimakkaasti kloriittiutuneet. Raekokojakaumaltaan näyte vaihtelee jonkun verran, kvartsia esiintyy juonissa suurina yksittäisinä rakeina, lisäksi opaakki on yleisesti raekooltaan suurempaa. Kiilteet ovat näytteessä suuntautuneet. Mikrorakoja esiintyy jonkun verran. Näytteen raekoko on < 1 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Toistokuormituskokeissa käytettyjen kiviainesten lujuus- ja muototutkimusten tulokset.

	Lakala iva	km 50+70 0	km 80+50 0	km 85+60 0	km 87+50 0	km 88+20 0	km 88+80 0
Ominaispaino (t/m ³)	2.76	2.64	2.62	2.79	2.67	2.63	2.72
Kuulamylyarvo	21.4	13.7	14.4	21.9	12.7	14.0	16.1
micro-Deval	15.7	7.9	9.4	17.5	6.8	8.3	10.6
Haurausarvo	18.2 (v)	23.7 (v)	21.4 (v)	13.5 (v)	18.8 (v)	24.8 (v)	17.1 (v)
Los Angeles-luku	29	29	29	21	25	32	25
Muotoarvo 8/12 mm	20.6	41.3	14.4	13.9	35.1	23.8	12.9
Pitkulaisuus 8/12 mm * ¹	2.49	2.95	2.37	2.33	2.84	2.64	2.34
Pitkulaisuus 11.2/16 mm * ¹	2.15	2.90	2.09	2.20	2.25	2.13	2.28
Liuskeisuus 8/12 mm * ²	1.69	1.81	1.63	1.65	1.71	1.77	1.53
Liuskeisuus 11.2/16 mm * ²	1.56	1.66	1.54	1.59	1.47	1.47	1.60
Litteysluku 4/16 mm	14	27					
Pitkulaisuus 8/12 mm, välpätty * ¹	2.28	2.62	2.24	2.12	2.47	2.31	2.16
Liuskeisuus 8/12 mm, välpätty * ²	1.54	1.51	1.46	1.46	1.49	1.53	2.12

(v) haurausarvo määritetty välpätystä materiaalista

*¹ Pitkulaisuudella tarkoitetaan rakeiden suurimman (c) ja pienimmän (a) dimension suhdetta (c/a)*² Liuskeisuudella tarkoitetaan rakeiden keskimmäisen (b) ja pienimmän (a) dimension suhdetta (b/a)

Tampere 27.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Km 88+800, työnumero 1891/3/1.

Tehtävä Tilaaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthiemenetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Graniitti

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Kvartsi (48,8 %), kalimaasälpä (25,6 %), plagioklaasi (22,0 %), biotiitti (3,0 %), kloriitti (0,6 %).

Kuvaus: Mineraalit esiintyvät näytteessä omamuotoisinaan ja suuntautumattomina. Mikrorakoilua on havaittavissa hyvin vähän, joissakin mineraalirakeissa esiintyy rakeiden sisäistä rakoilua. Mineraalien muuttuneisuus näytteessä on hyvin vähäistä. Näytteen mineraalien raekoko on 1–3 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Tampere 28.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Km 85+600, työnumero 1891/3/4.

Tehtävä Tilaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthie-menetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Kordieriittipitoinen kiillegneissi

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Kordieriitti (30,0 %), kvartsi (29,8 %), kalimaasälpä (19,4 %), biotiitti (9,8 %), muskoviitti (8,4 %), plagioklaasi (7,8 %), opaakki (0,8 %).

Kuvaus: Mineraalien muutoksia on havaittavissa melko vähän lukuun ottamatta biotiittin osittaista kloriittiutumista. Näytteessä on melko runsaasti mikrorakoja, rakeiden välisissä mikroraoissa on yleisesti hienorakeista kiillettä rakotäytteenä. Näytteen mineraalien raekoko on 1-3 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Tampere 27.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Km 88+200, työnumero 1891/3/5.

Tehtävä Tilaaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthie-menetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Graniitti

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Kvartsi (42,2 %), plagioklaasi (29,8 %), kalimaasälpä (27,6 %), muskoviitti (0,4 %).

Kuvaus: Näytteessä voidaan havaita plagioklaasin serisiittiytymistä sekä kiilteiden kloriittiutumista mineraalimuutoksina. Myös amfiboleissa voidaan havaita muuttumista. Kiilteet esiintyvät pääosin erittäin hienorakeisina mineraalien rajapinnoilla. Mikrorakoilua voidaan havaita vain vähän. Kiviaineksessa on yksittäisiä granaattirakeita, jotka makroskooppisessa näytteessä voidaan nähdä tummina pisteinä kivessä. Raekoko on 1-3 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Tampere 27.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Km 80+500, työnumero 1891/3/6.

Tehtävä Tilaaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthiemenetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Graniitti

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Kvartsi (32,6 %), plagioklaasi (33,0 %), kalimaasälpä (28,8 %), biotiitti (3,0 %), muskoviitti (2,6 %).

Kuvaus: Näytteessä esiintyy runsaasti täytteisiä rakoja, joissa rakotäytteenä kiillettä (muskoviittia). Myös täytteettömiä rakoja esiintyy. Biotiitti näytteessä on osin kloriittiutunut, sekä maasälvät osin serisiittiytäneet. Näytteen raekoko on 1-3 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Tampere 27.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Km 50+700, työnumero 1891/3/3.

Tehtävä Tilaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthiemenetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Granodioriitti

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

Kvartsi (44,8 %), plagioklaasi (41,0 %), kalimaasälpä (13,8 %), biotiitti (0,6 %), granaatti (yksittäisiä rakeita).

Kuvaus: Mineraalien muutoksina voidaan havaita plagioklaasin serisiittiytymistä sekä biotiitin kloriittiutumista. Näytteessä esiintyy runsaasti täytteistä rakoilua ja mikrorakoilua. Rakotäytteenä esiintyy opaakkia ja rautaoksidia. Näytteen mineraalien raekoko on 1–3 mm.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Jukka Viitanen
Tutkija

Raimo Uusinoka
Professori

Tampere 28.1.2005

KIVIAINEKSEN PETROGRAFINEN TUTKIMUS

Näyte Lohkarenäyte, Lakalaiva, työnumero 1891/3/2.

Tehtävä Tilaajan toimittamien näytteiden petrografinen tutkimus ohuthiemenetelmällä.

Menetelmä(t) Ohuthieen valmistaminen, jonka jälkeen tutkimus: mikroskooppitutkimus polarisaatiomikroskoopilla.

Tulokset Kivilaji: Kiillegneissi

Mineraalit (paljousjärjestyksessä):

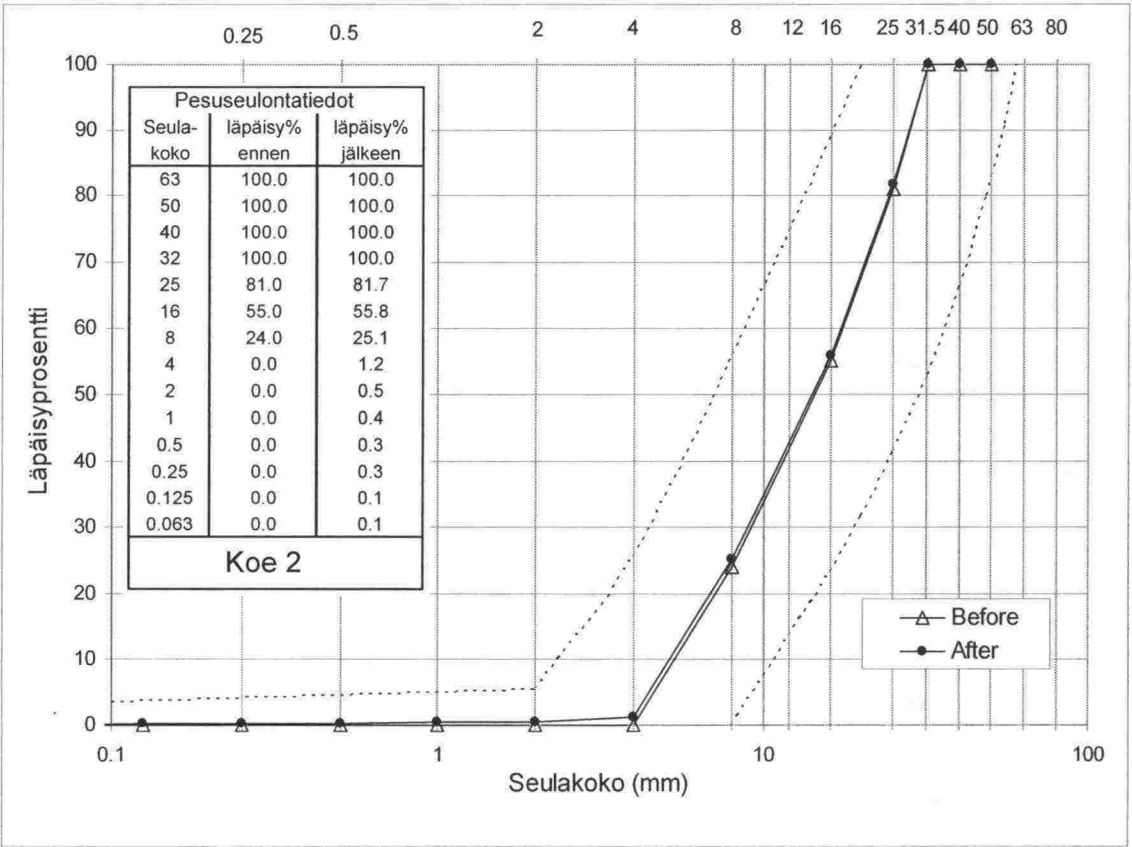
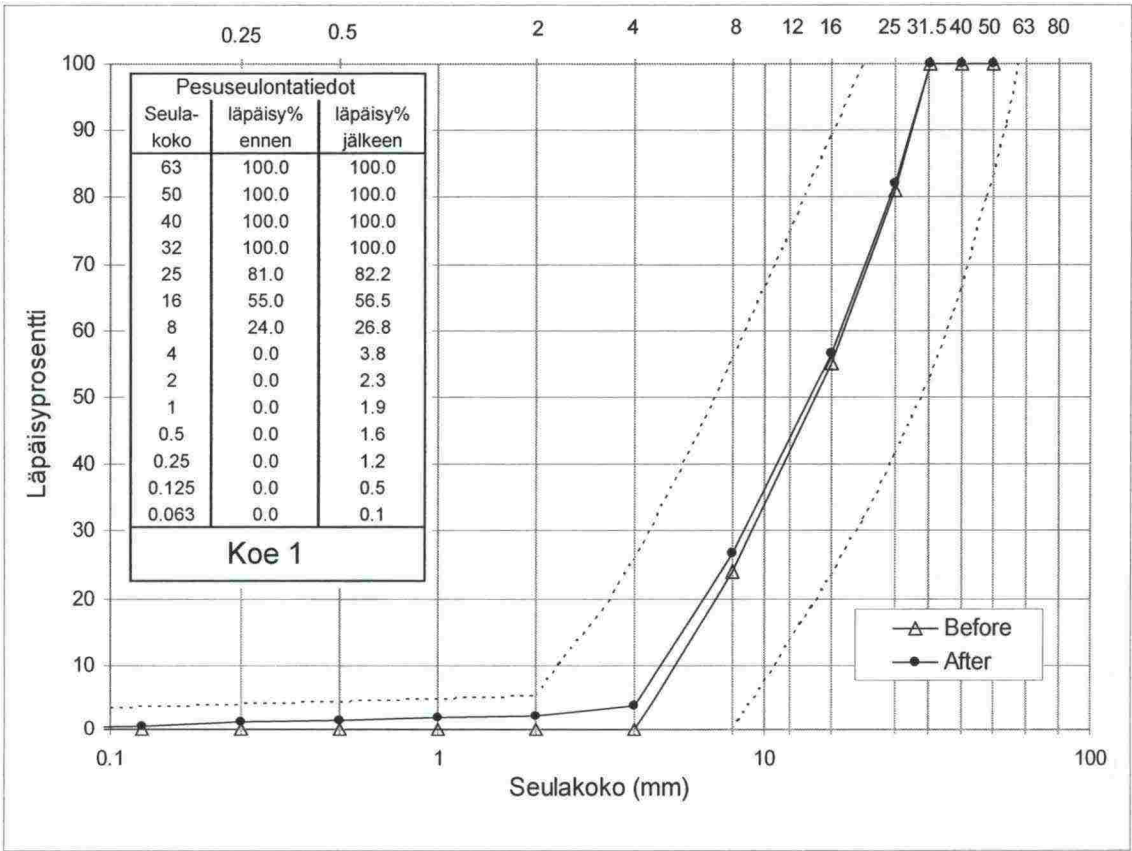
Kvartsi (37,8 %), plagioklaasi (28,8 %), biotiitti (23,8 %), kloriitti (6,8 %), kalimaasälpä (2,2 %), opaakki (0,4 %), granaatti (0,2 %).

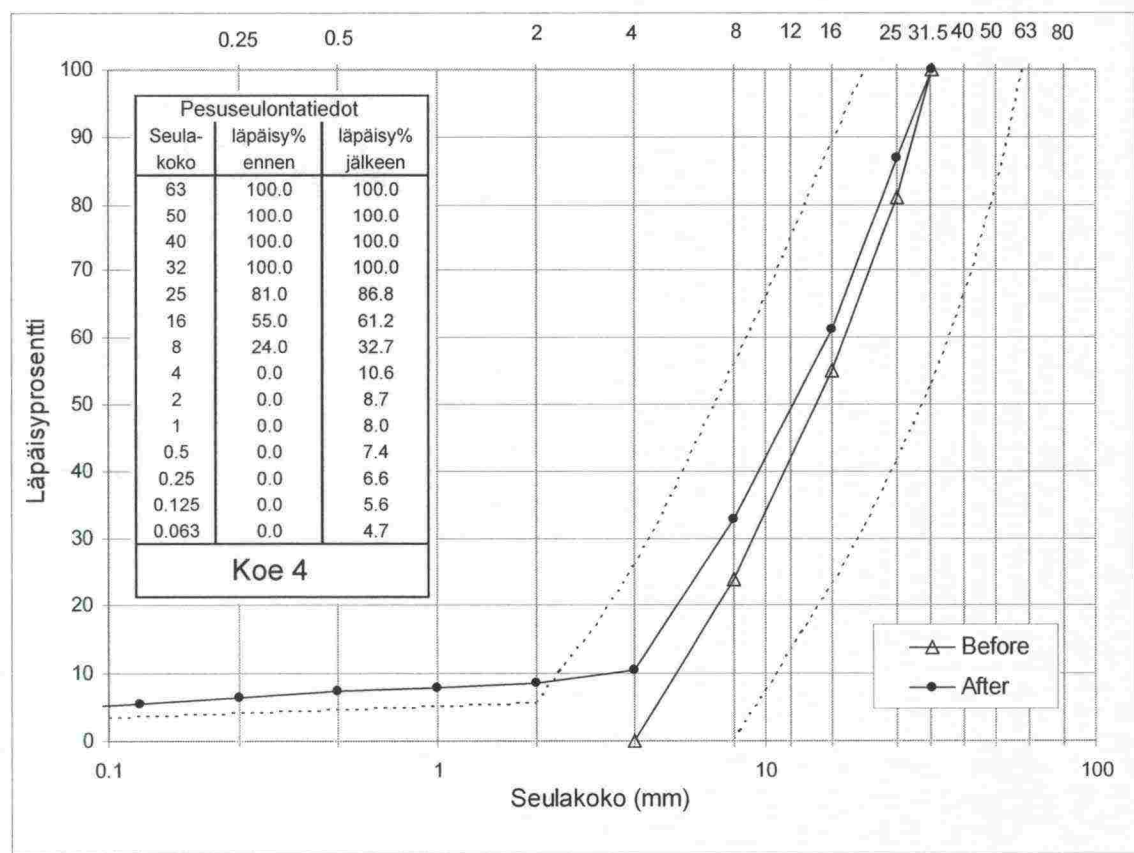
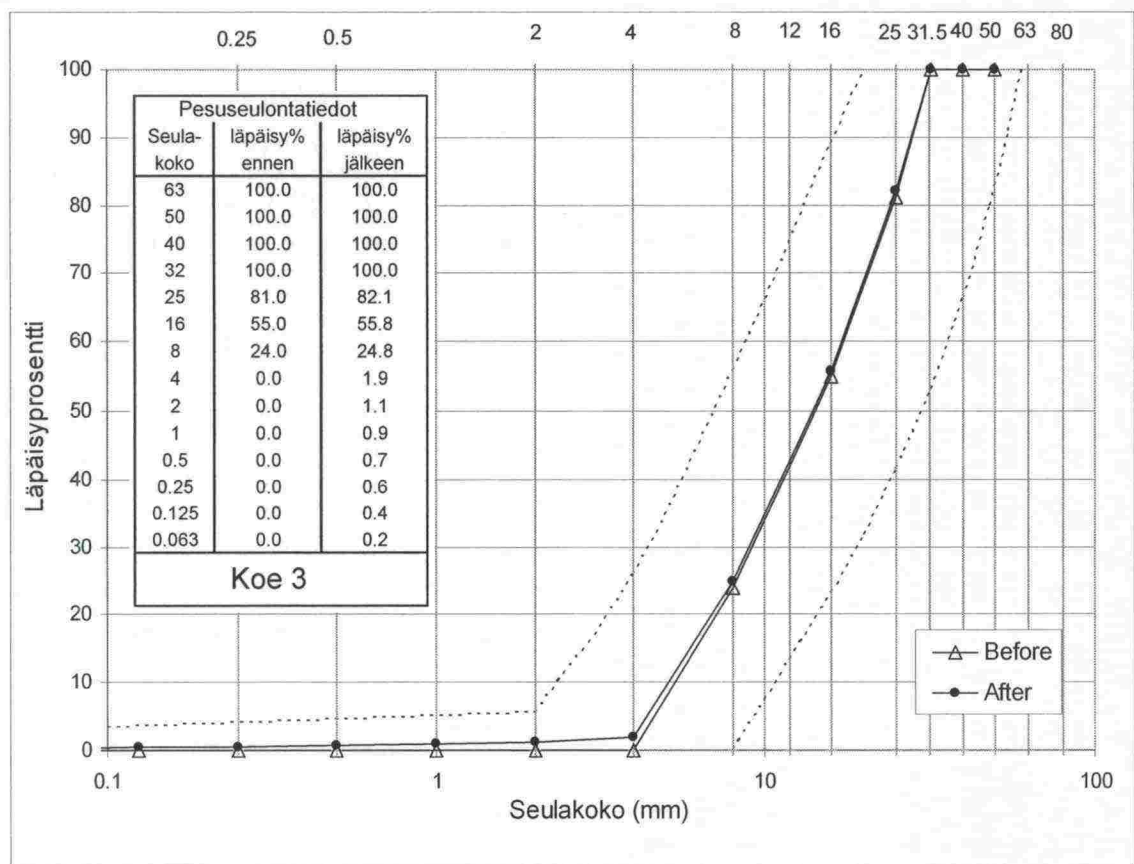
Kuvaus: Näytteen mineraaleissa on yleisesti havaittavissa muuttumista, maasälvät ovat paikoin hyvinkin voimakkaasti serisiittiytyneet ja biotiitti osin täysin kloriittiutunut. Näytteessä voidaan havaita sekä mineraalien sisäistä että rajapintoja myöden kulkevaa mikrorakoilua, joka ei kuitenkaan ole täytteistä. Näytteen raekoko on 1-3 mm.

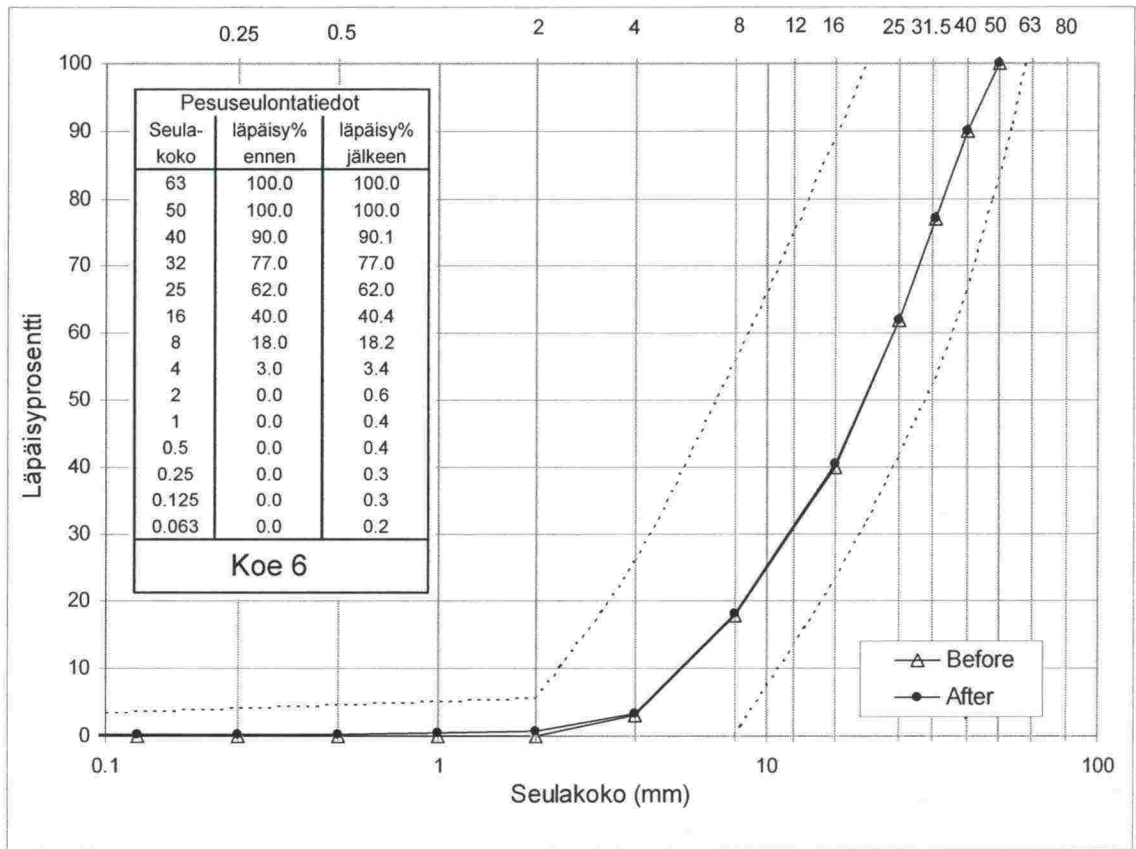
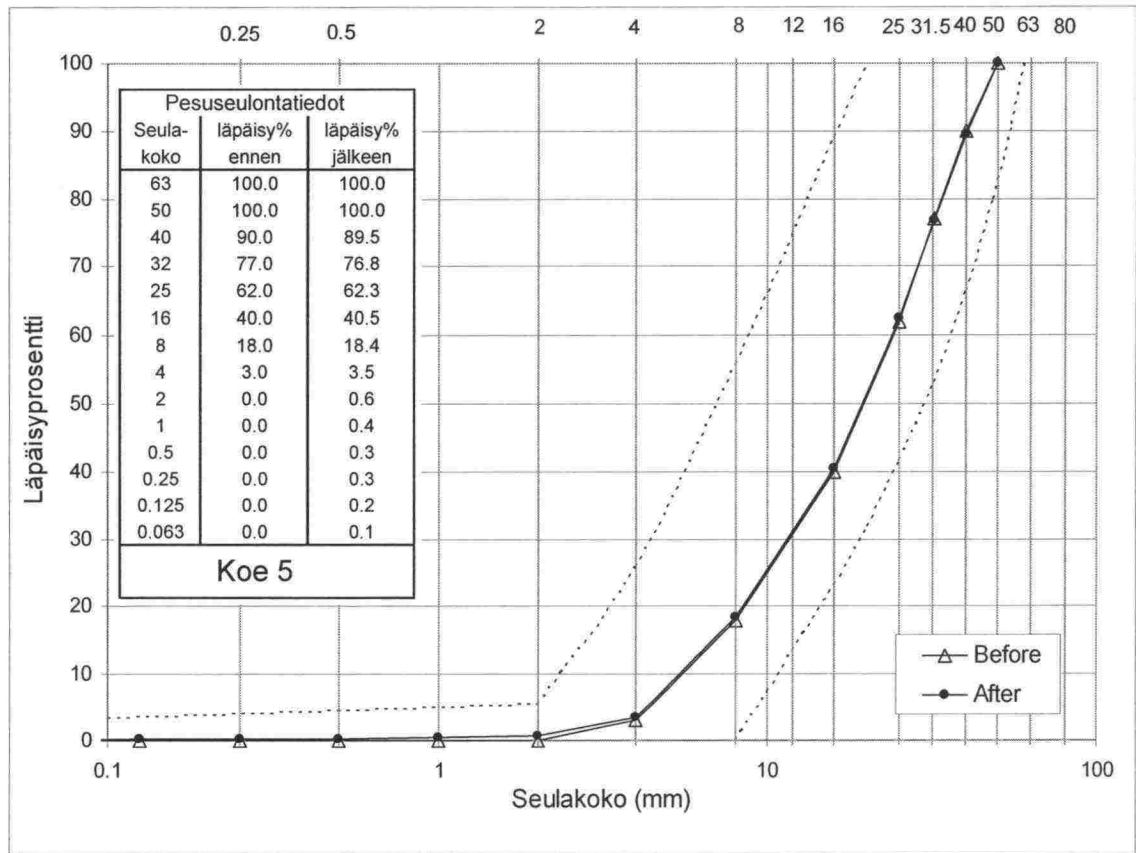
Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

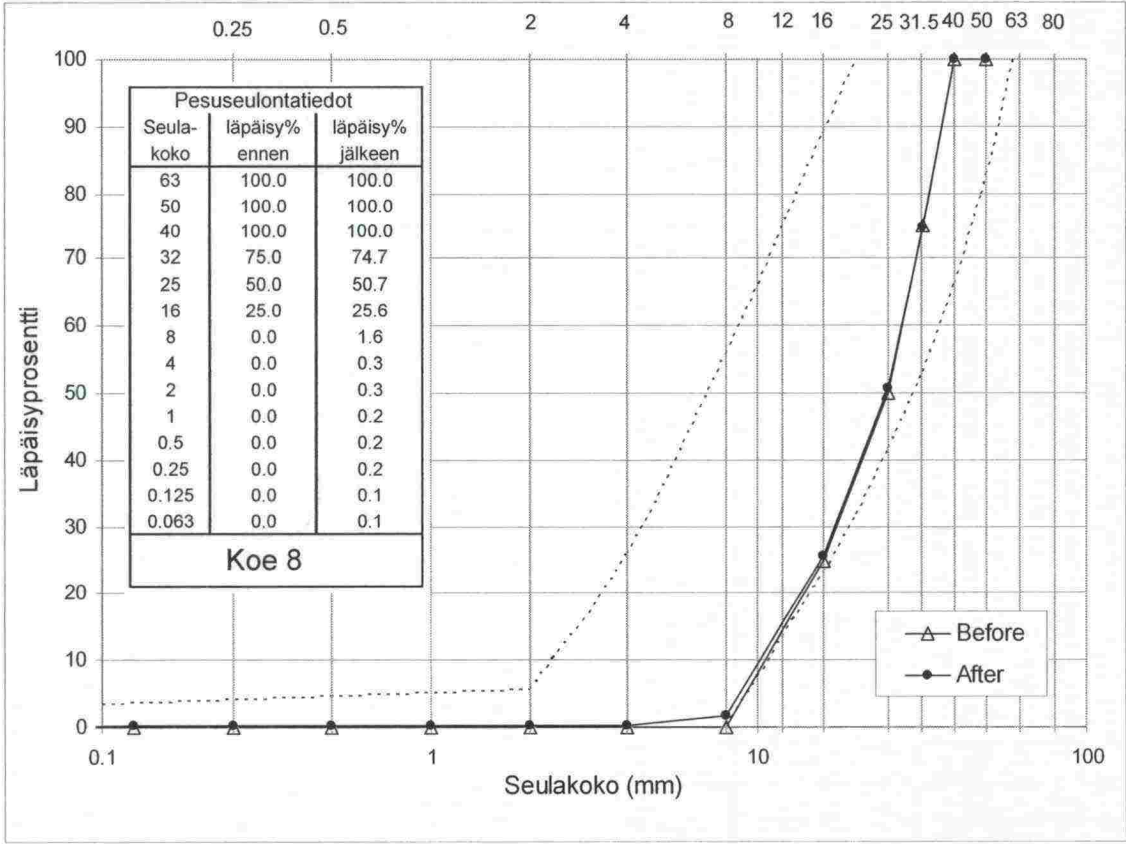
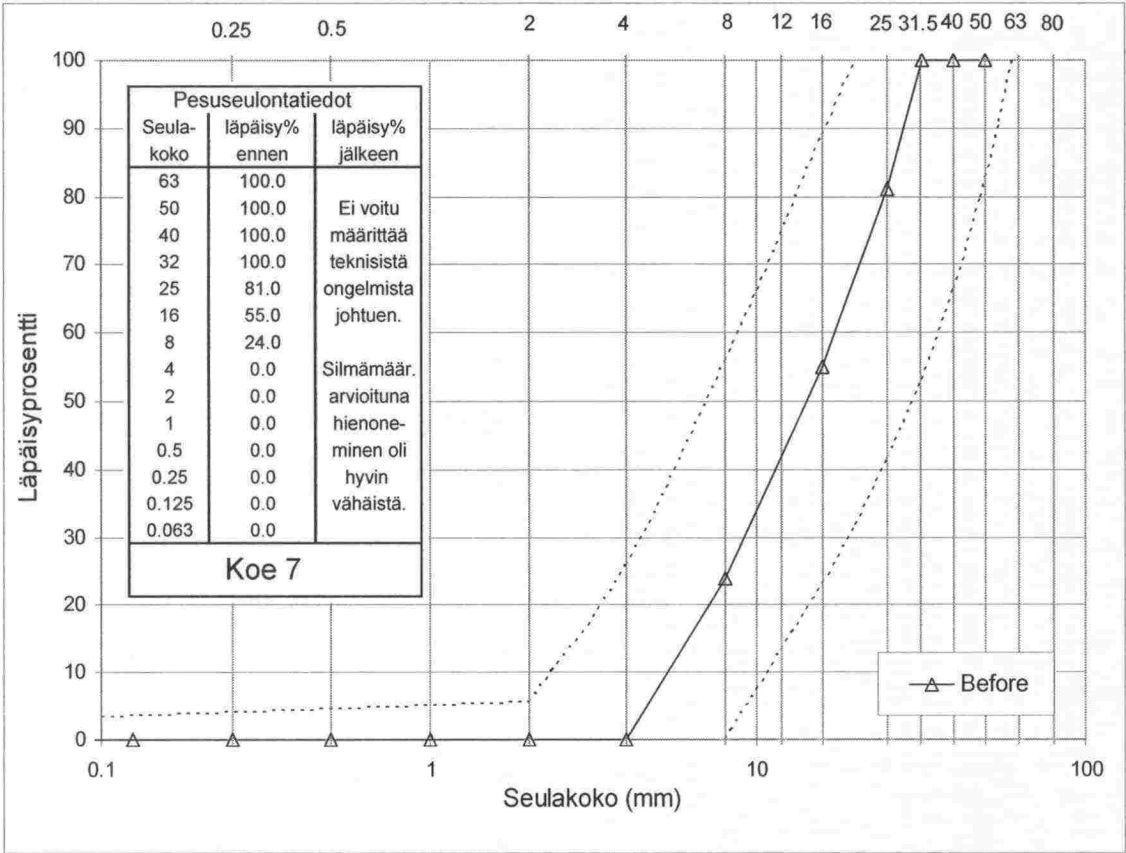
Jukka Viitanen
Tutkija

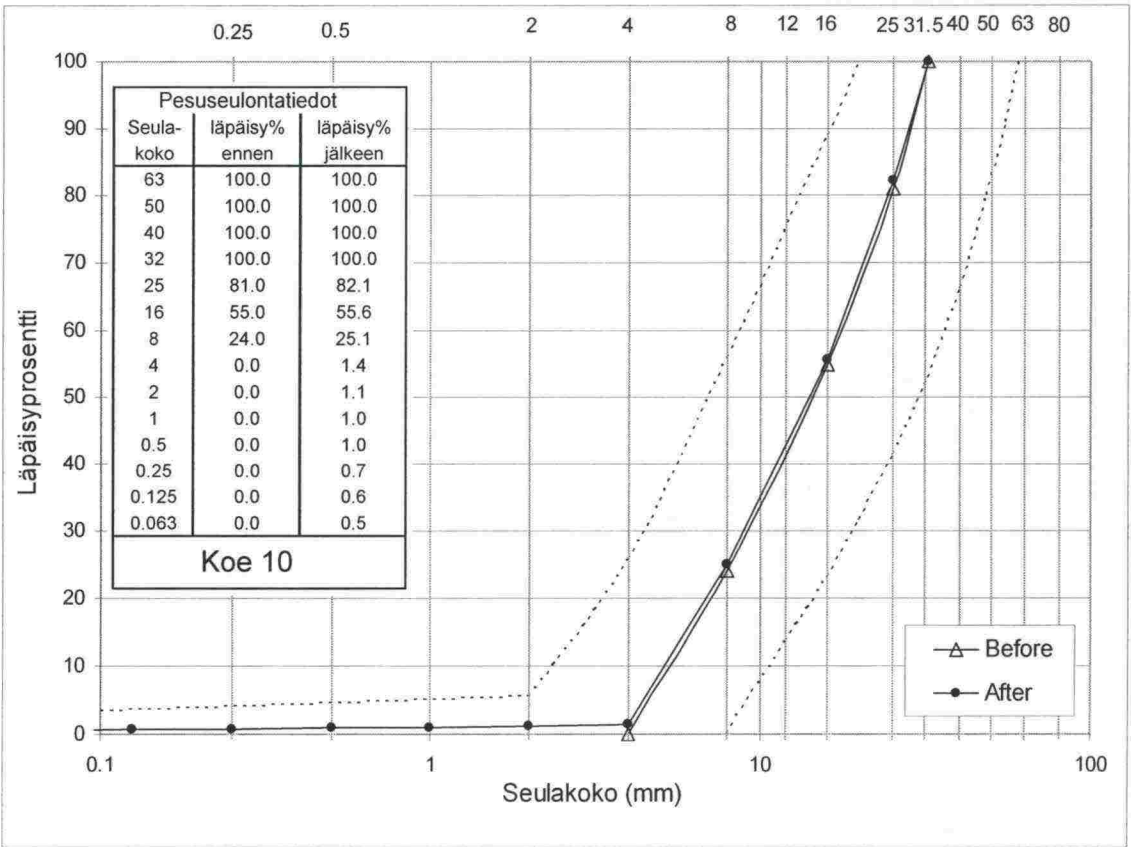
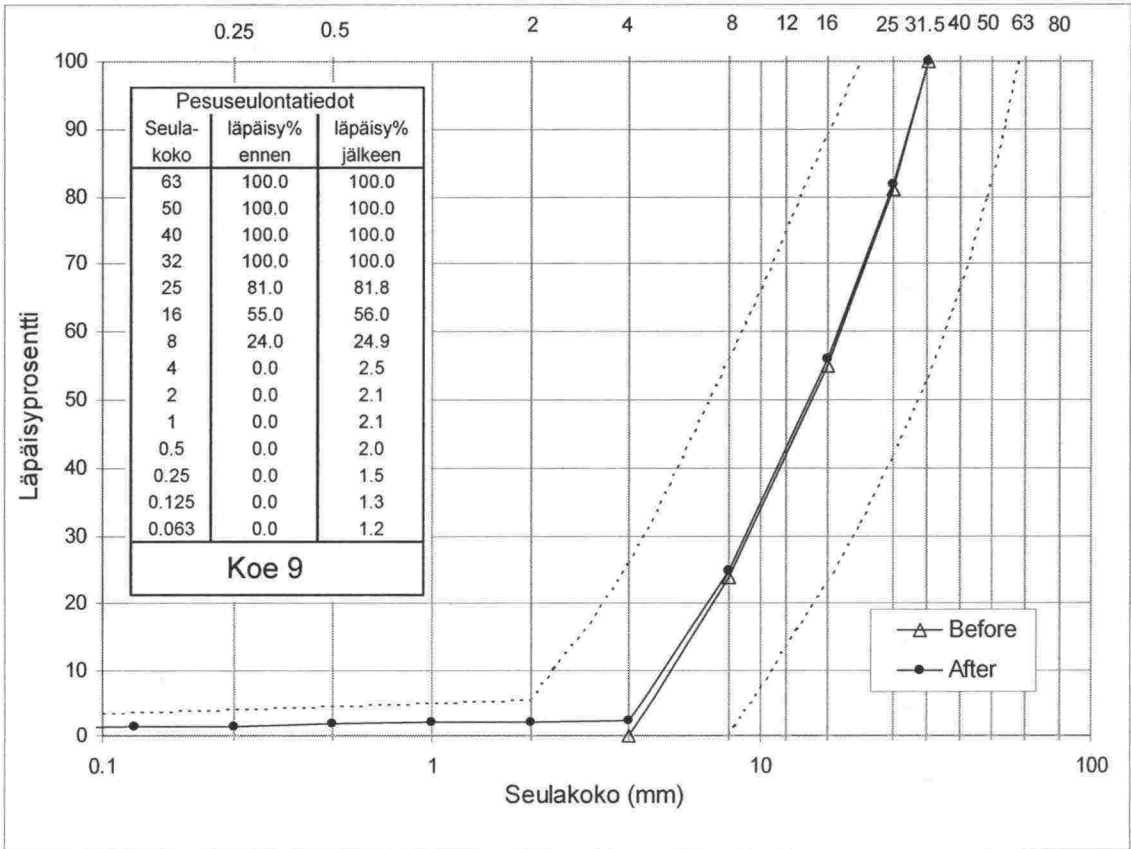
Raimo Uusinoka
Professori

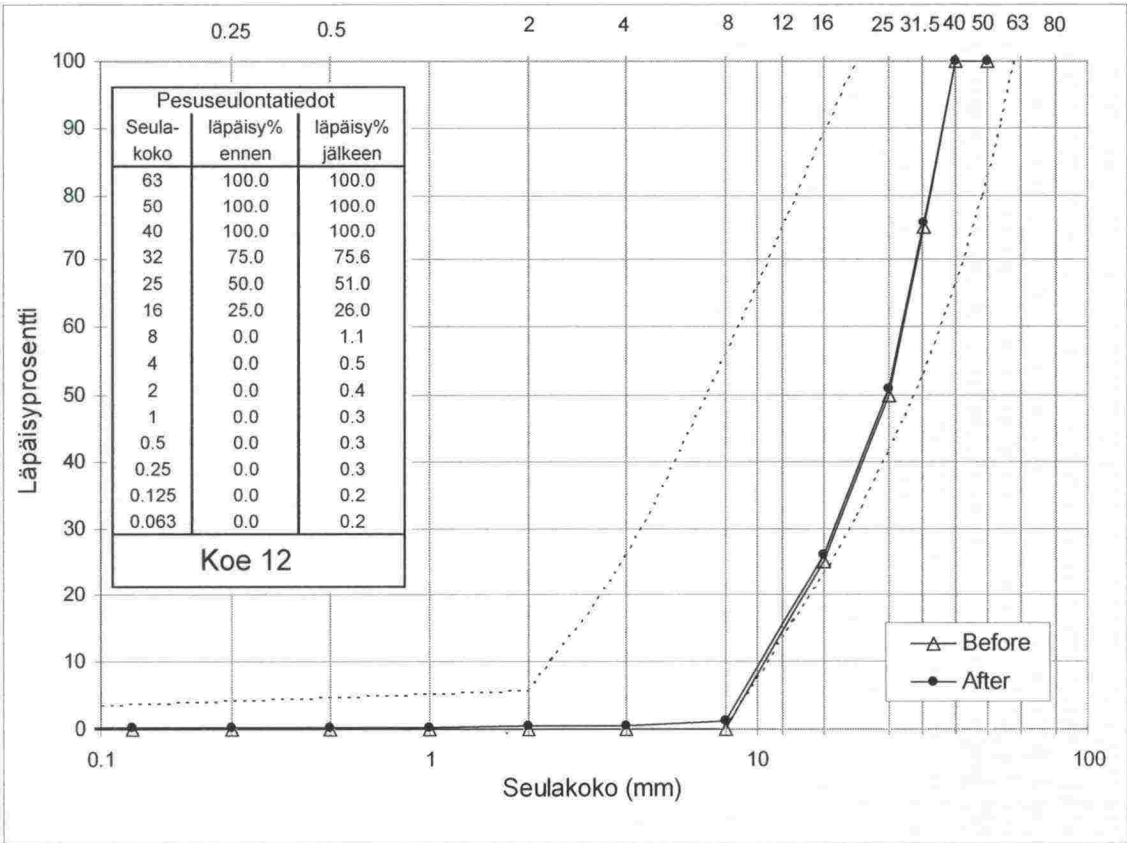
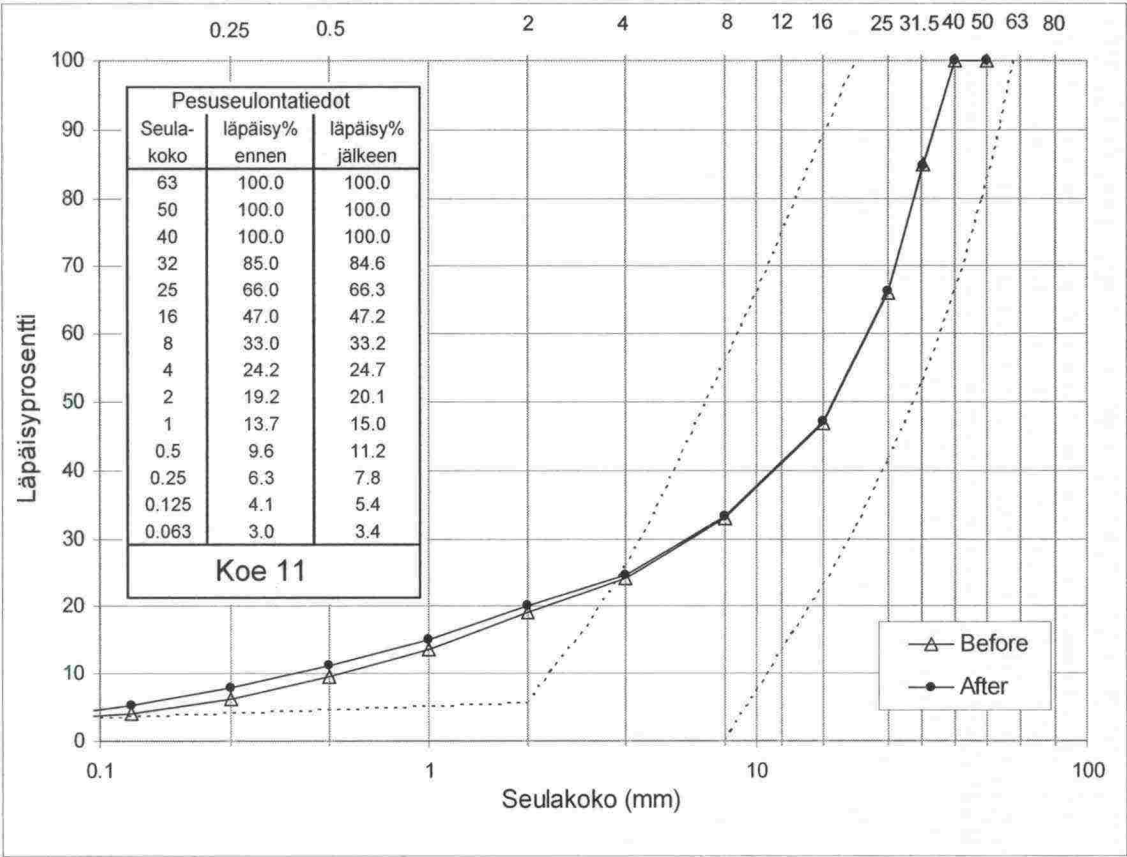


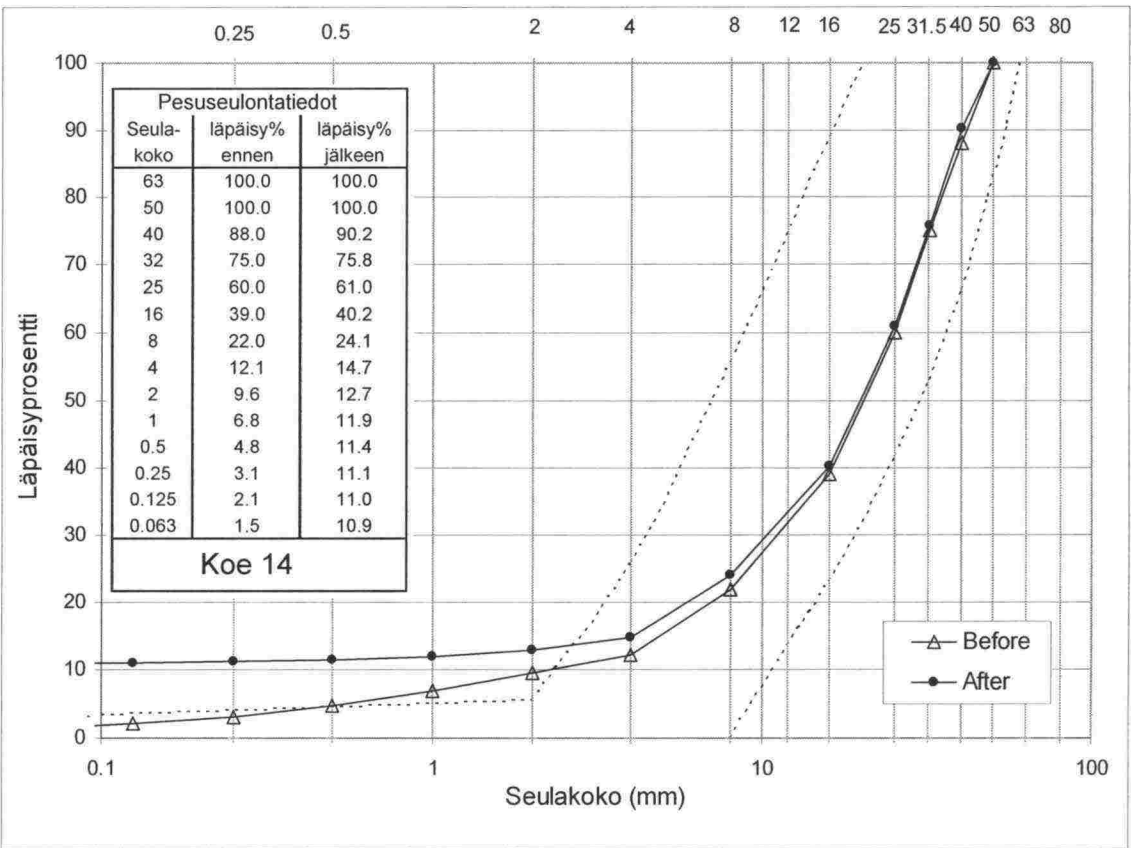
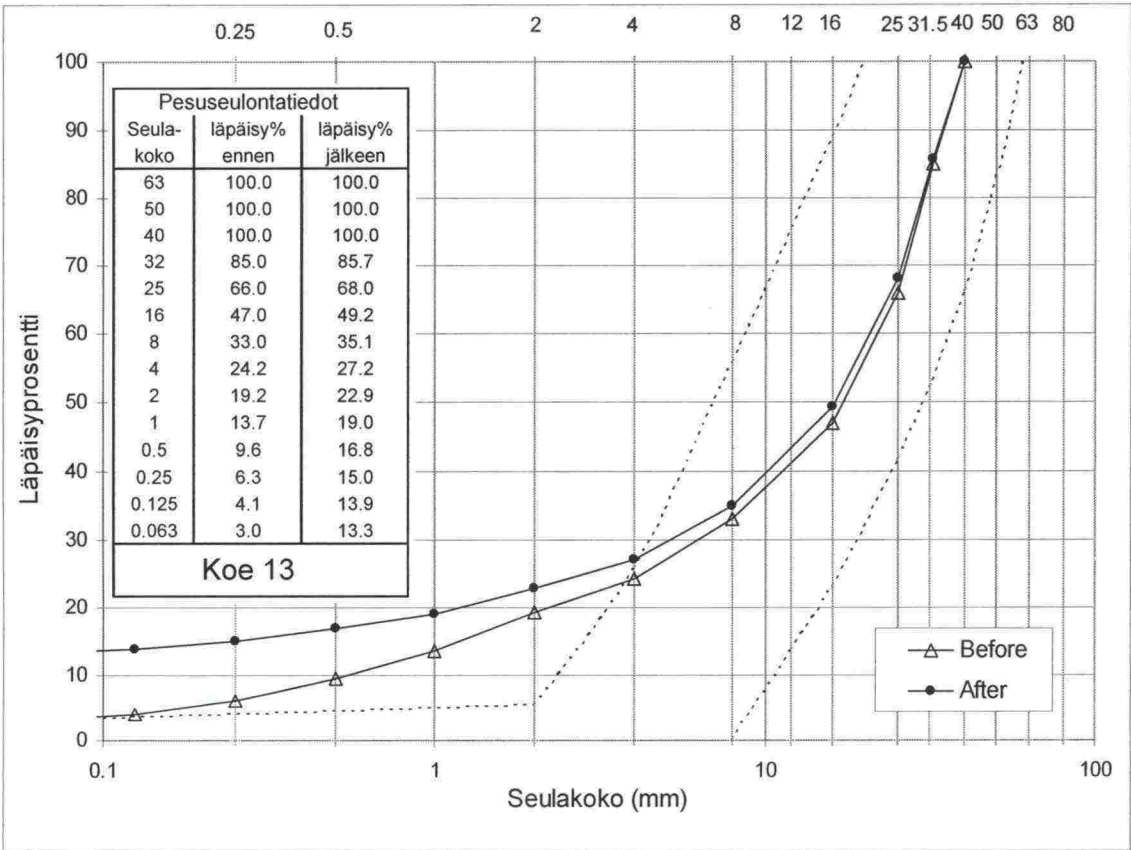


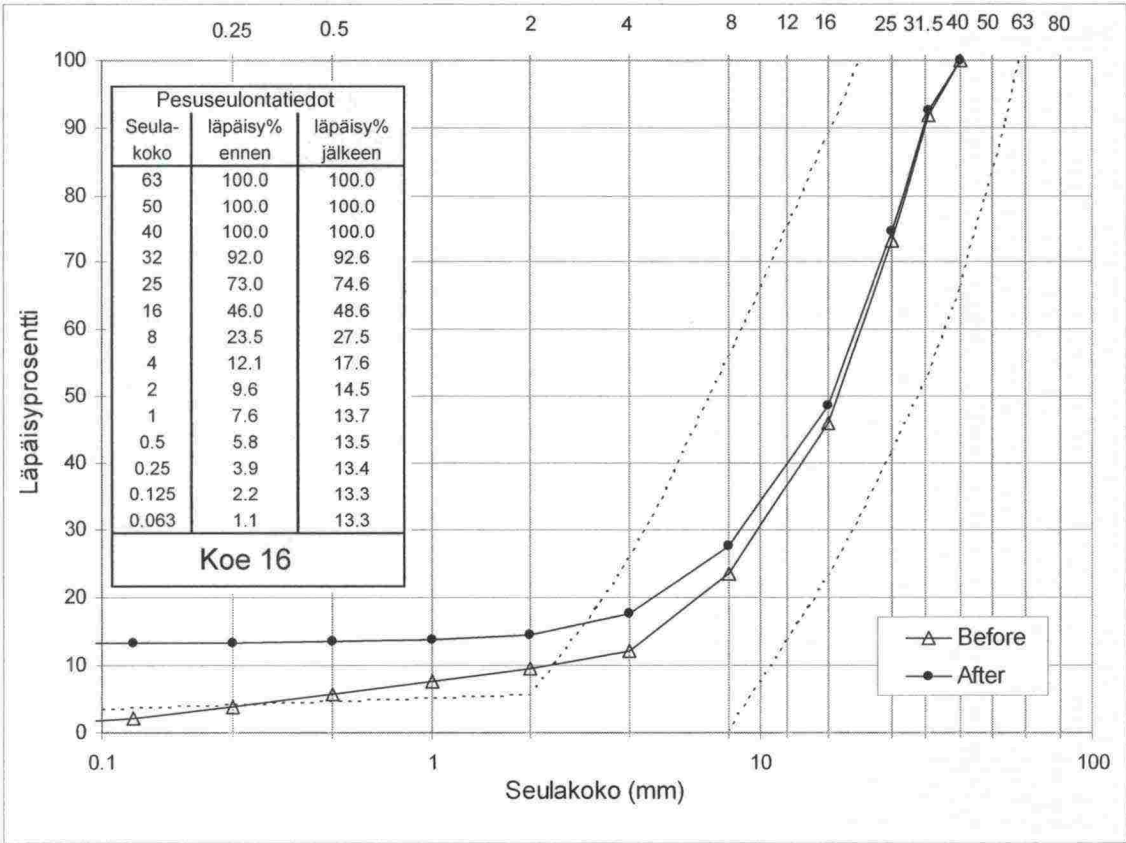
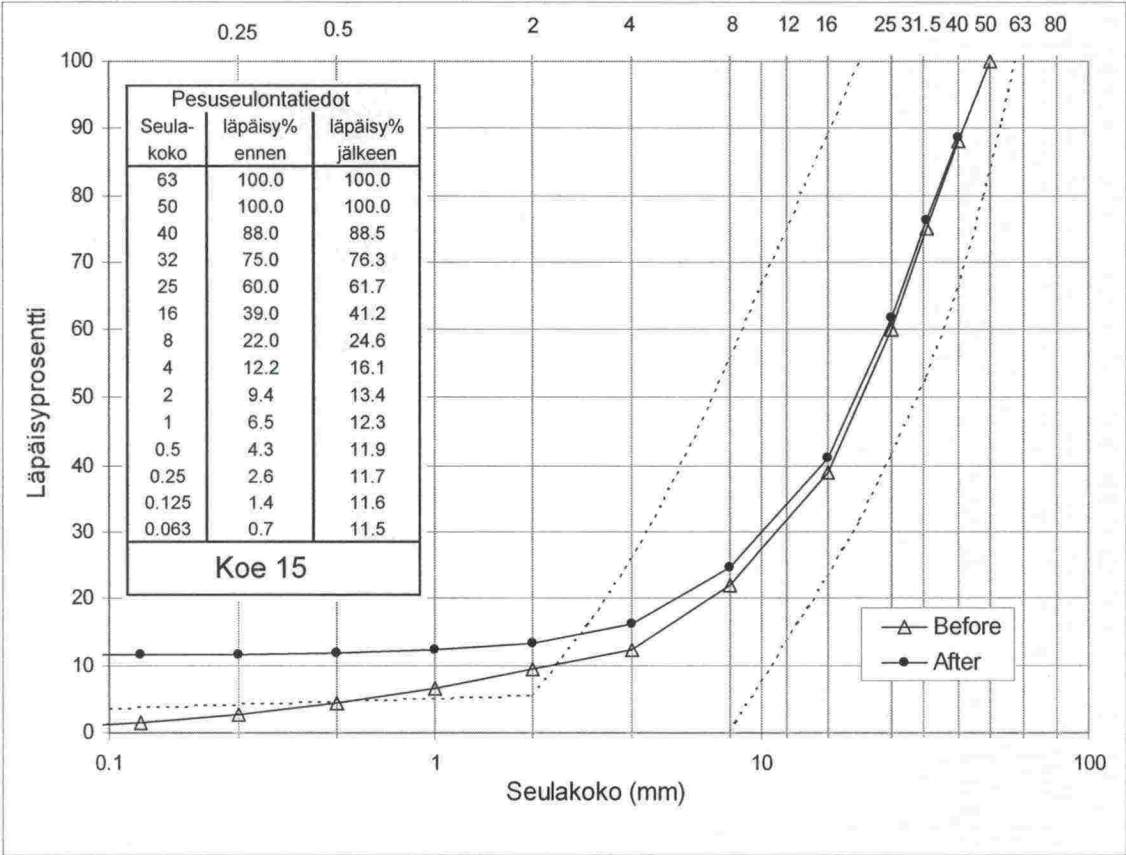


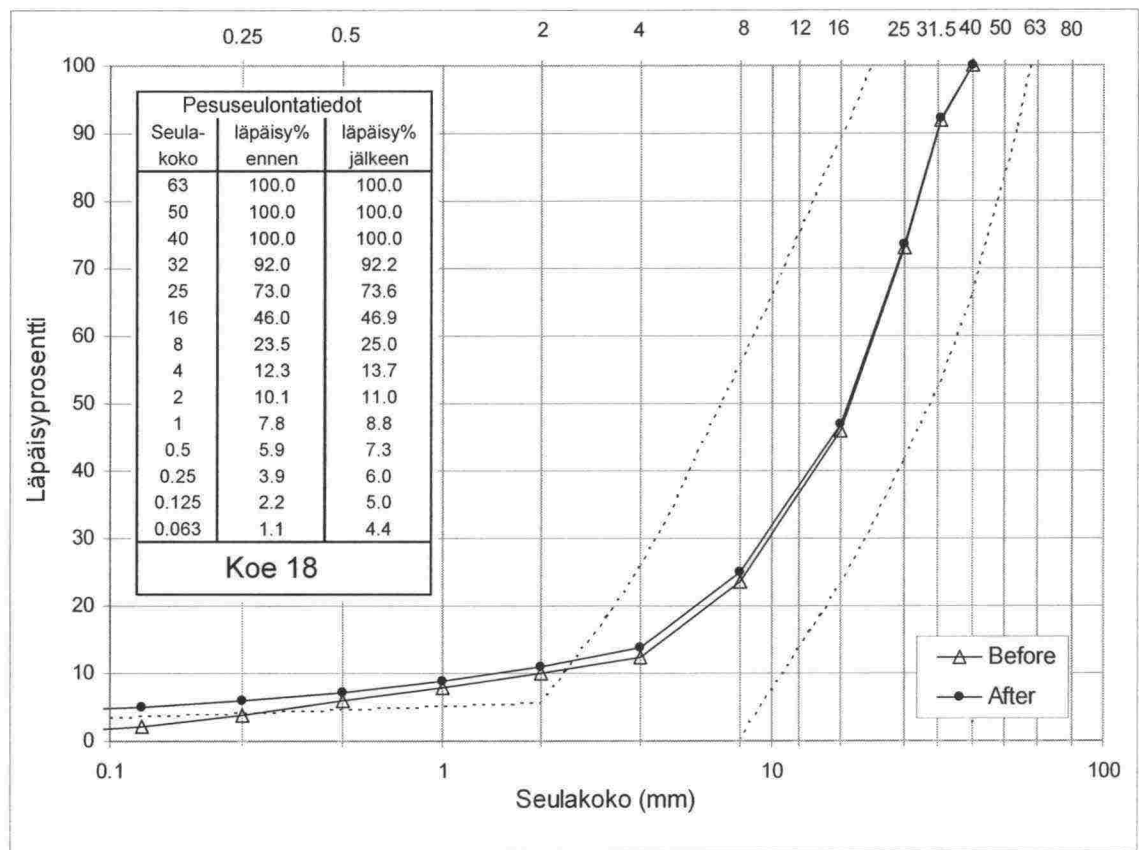
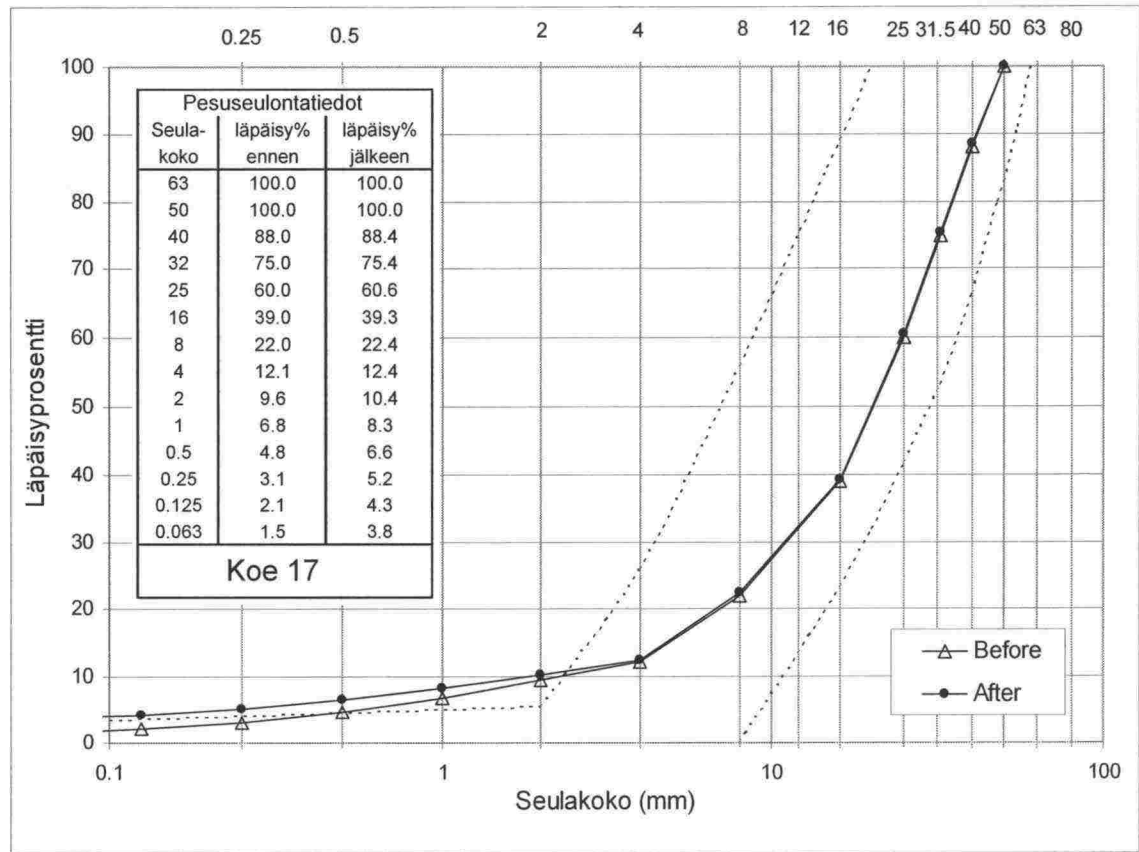


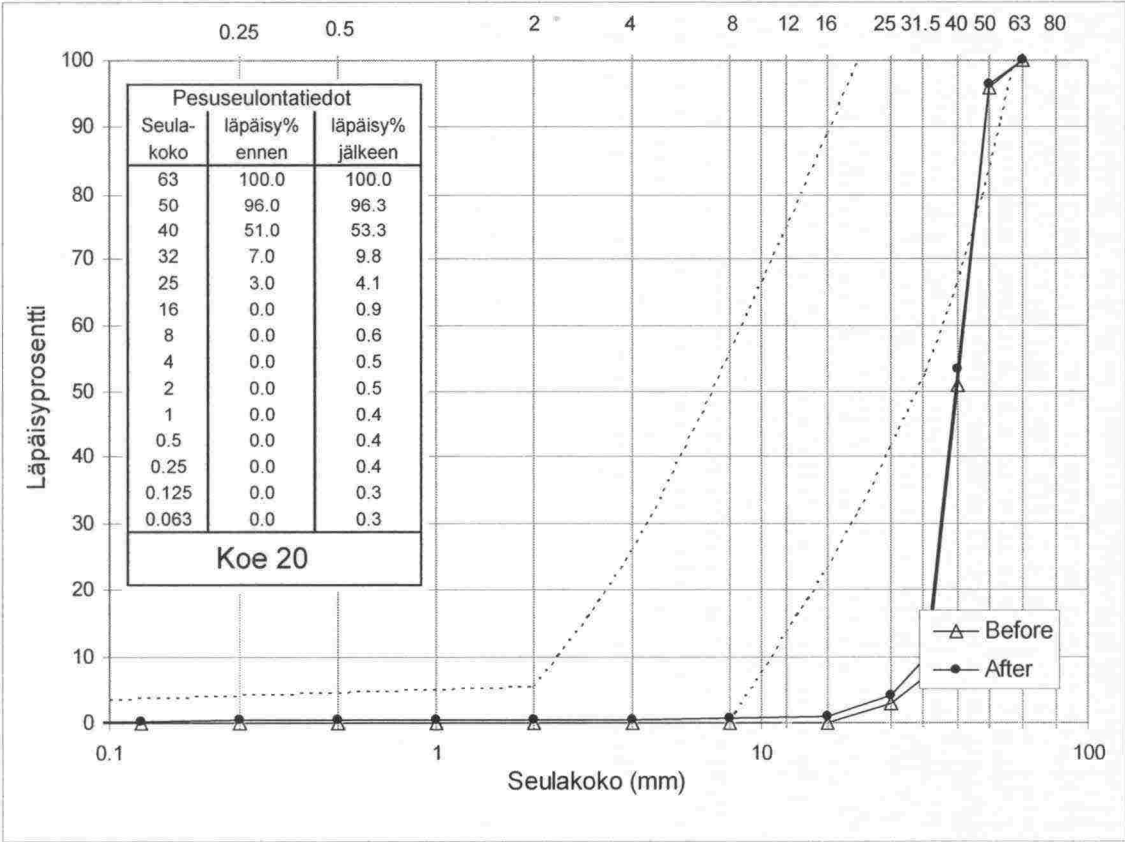
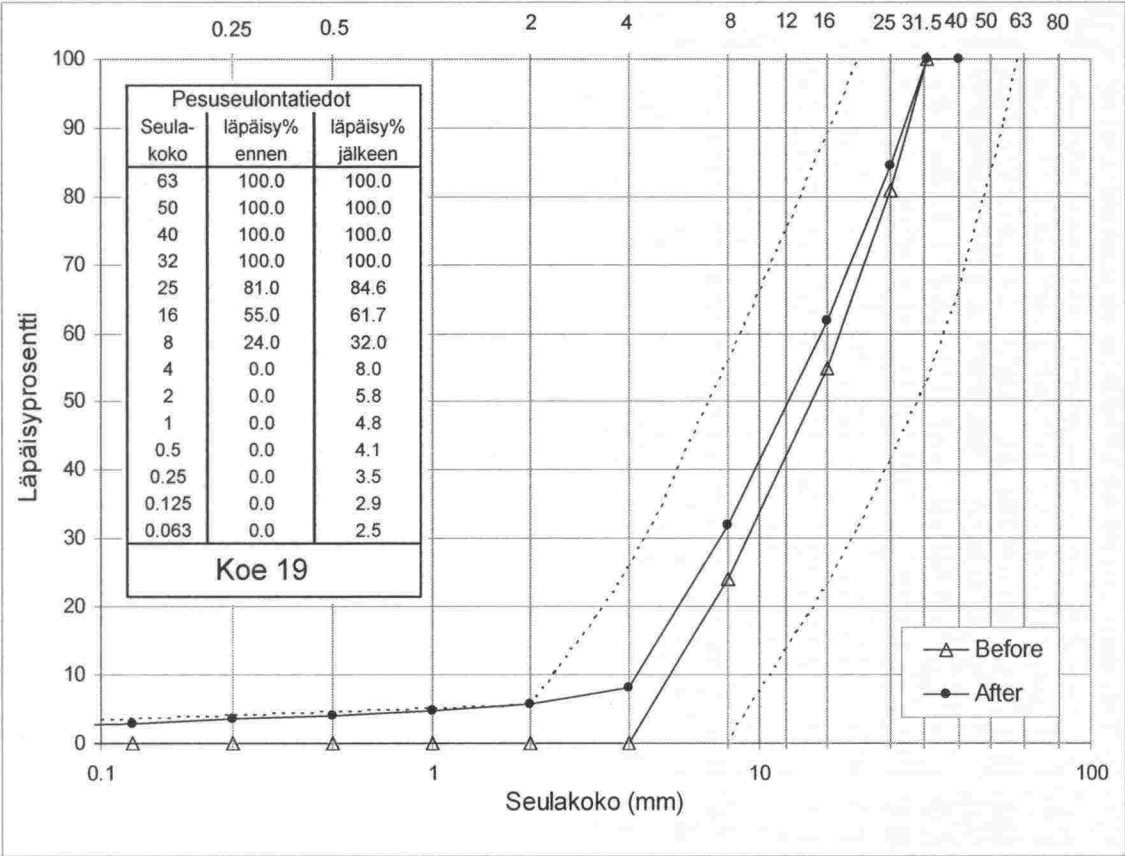


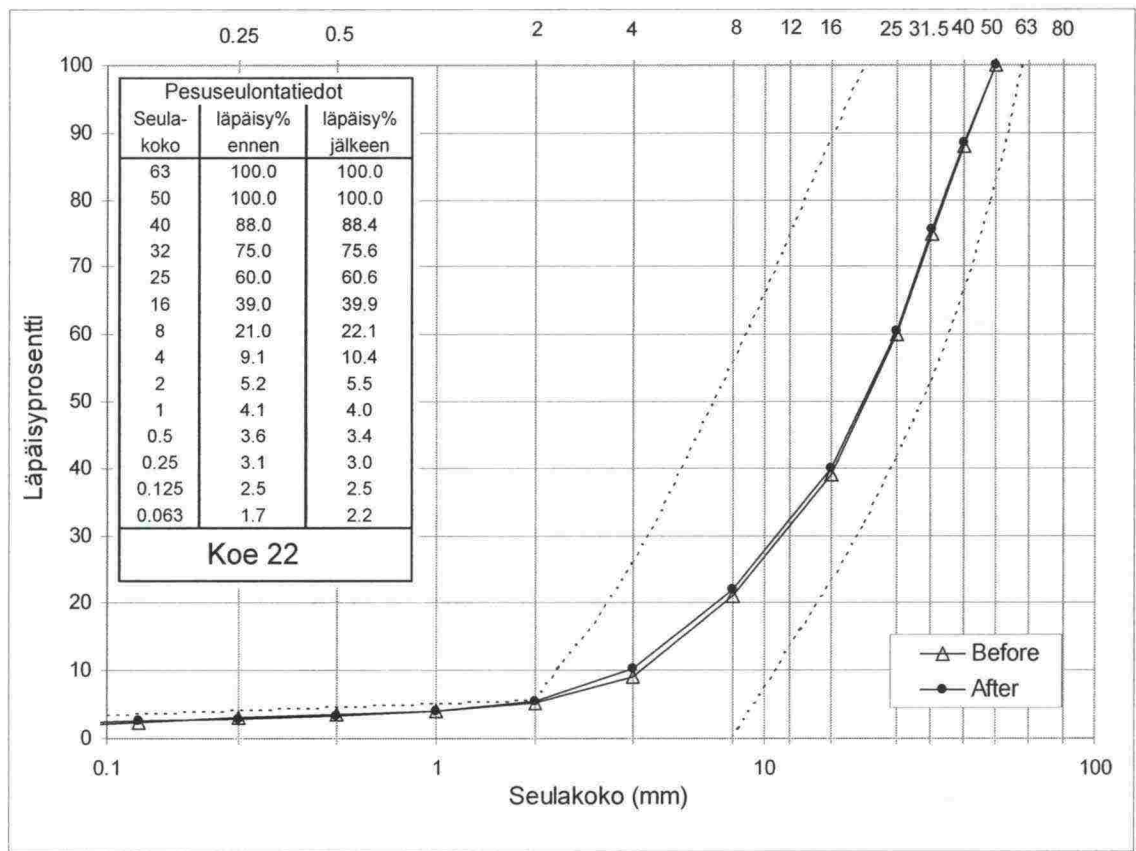
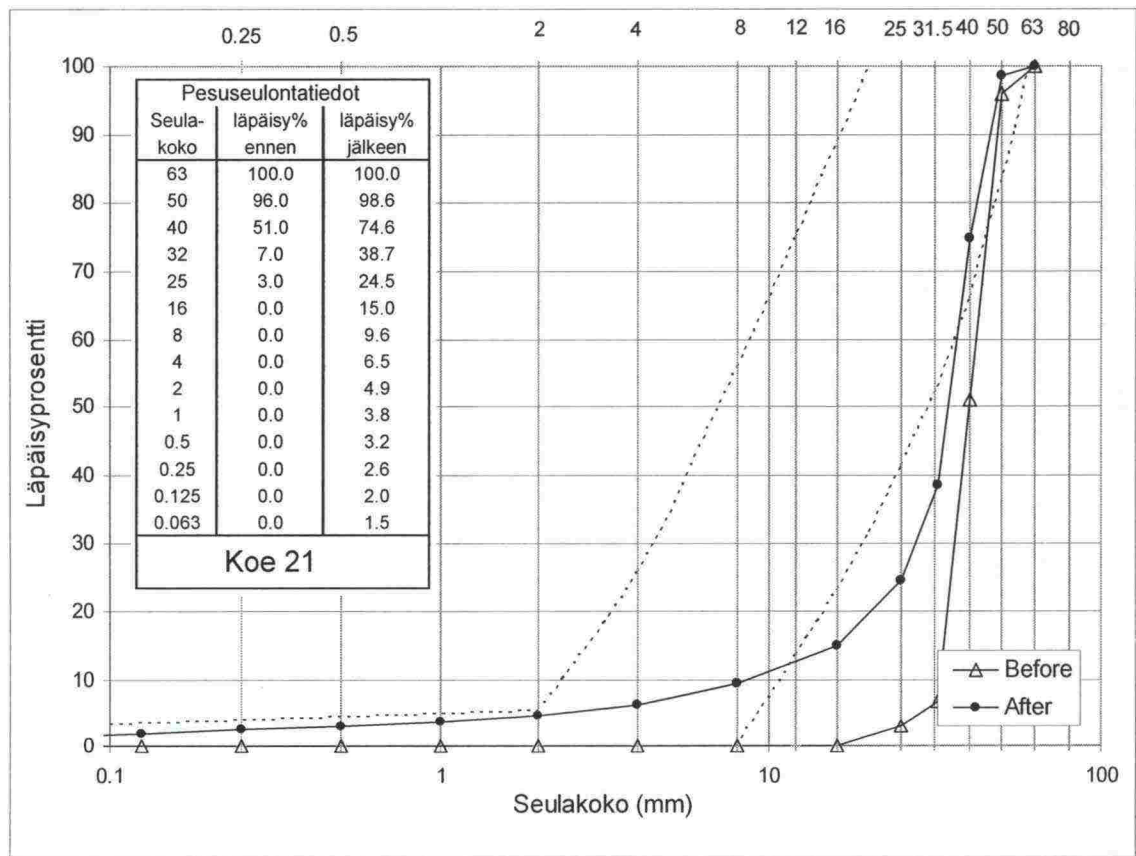


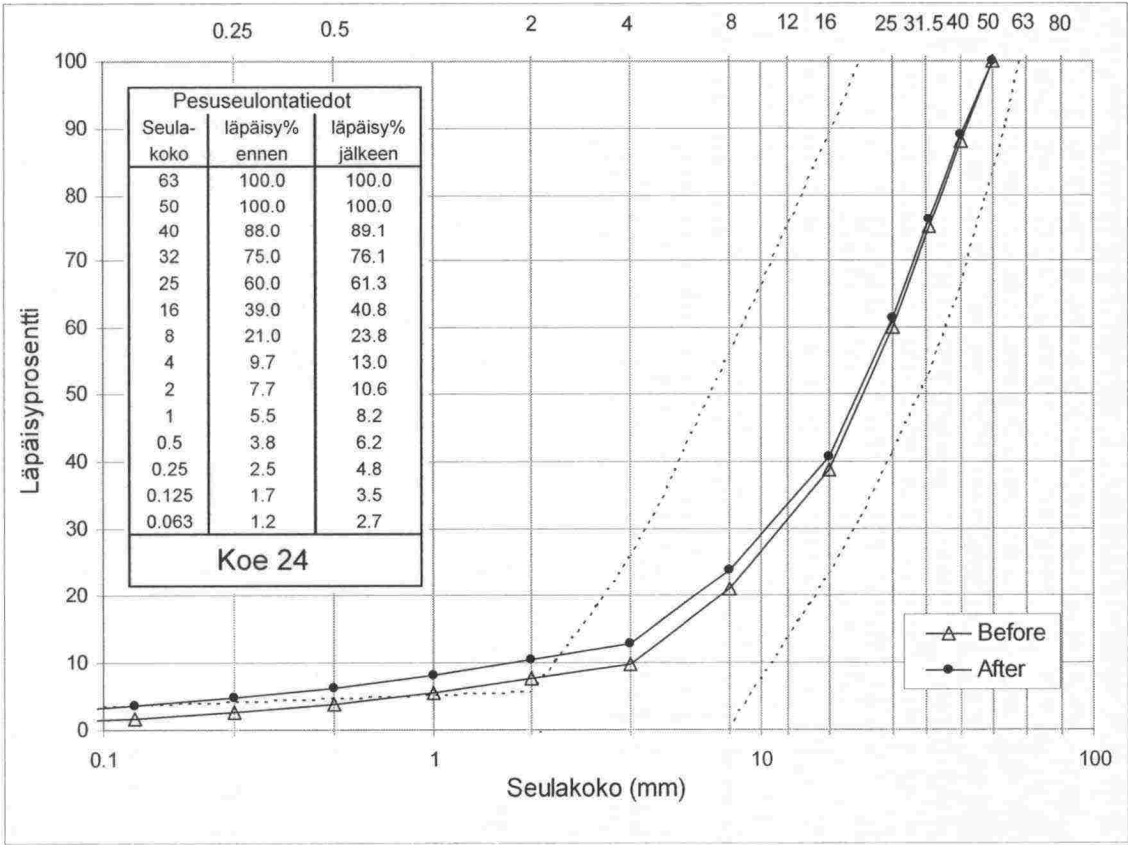
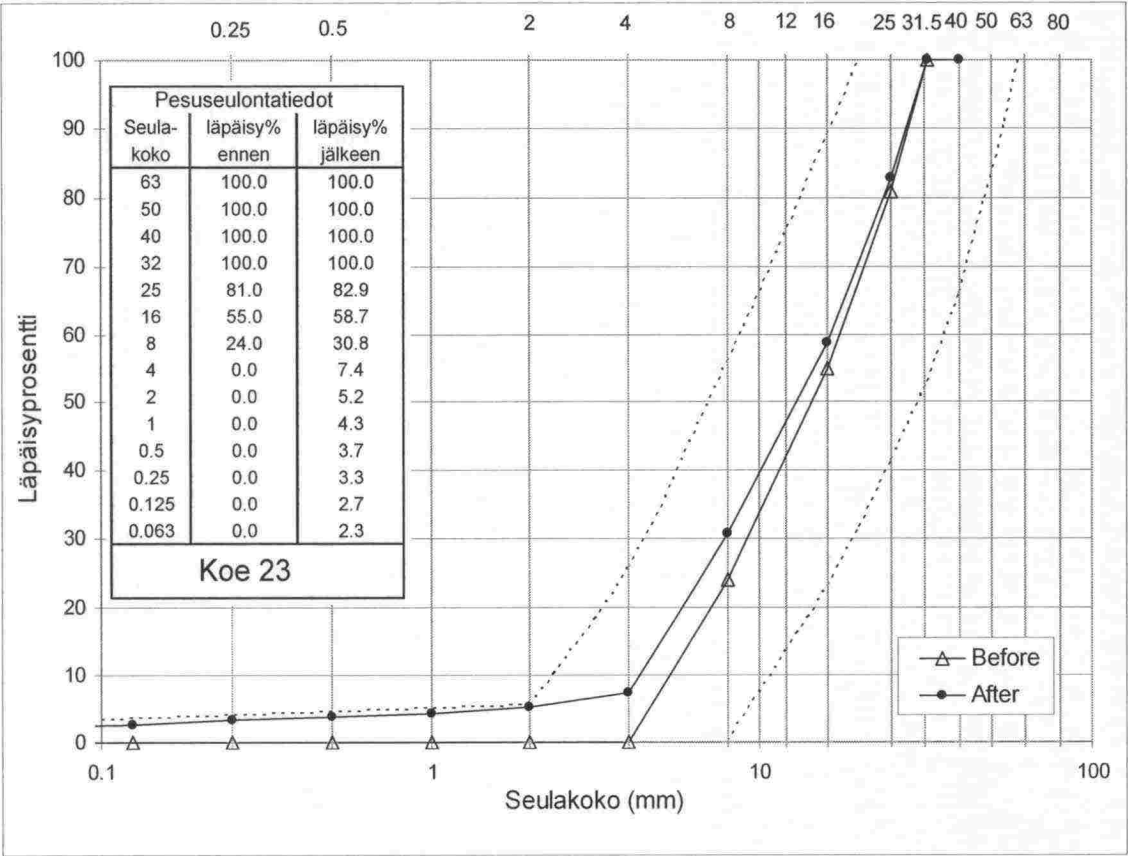


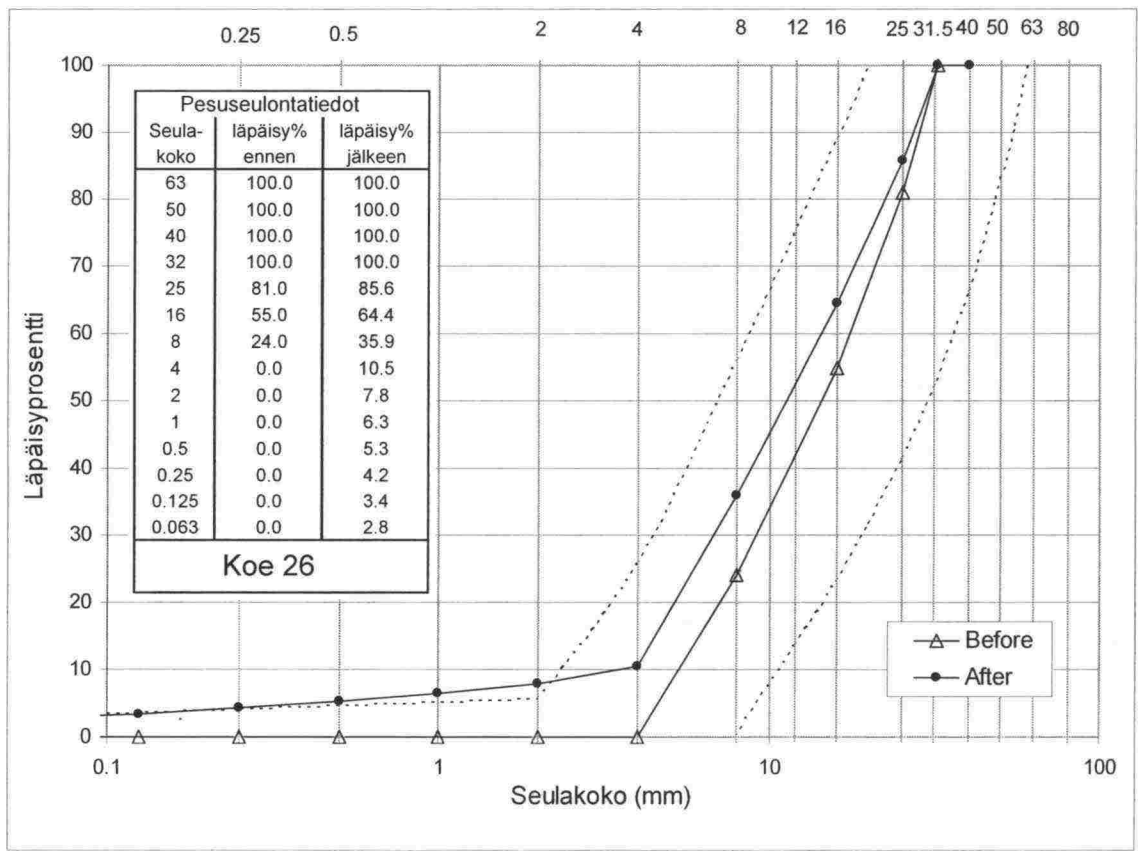
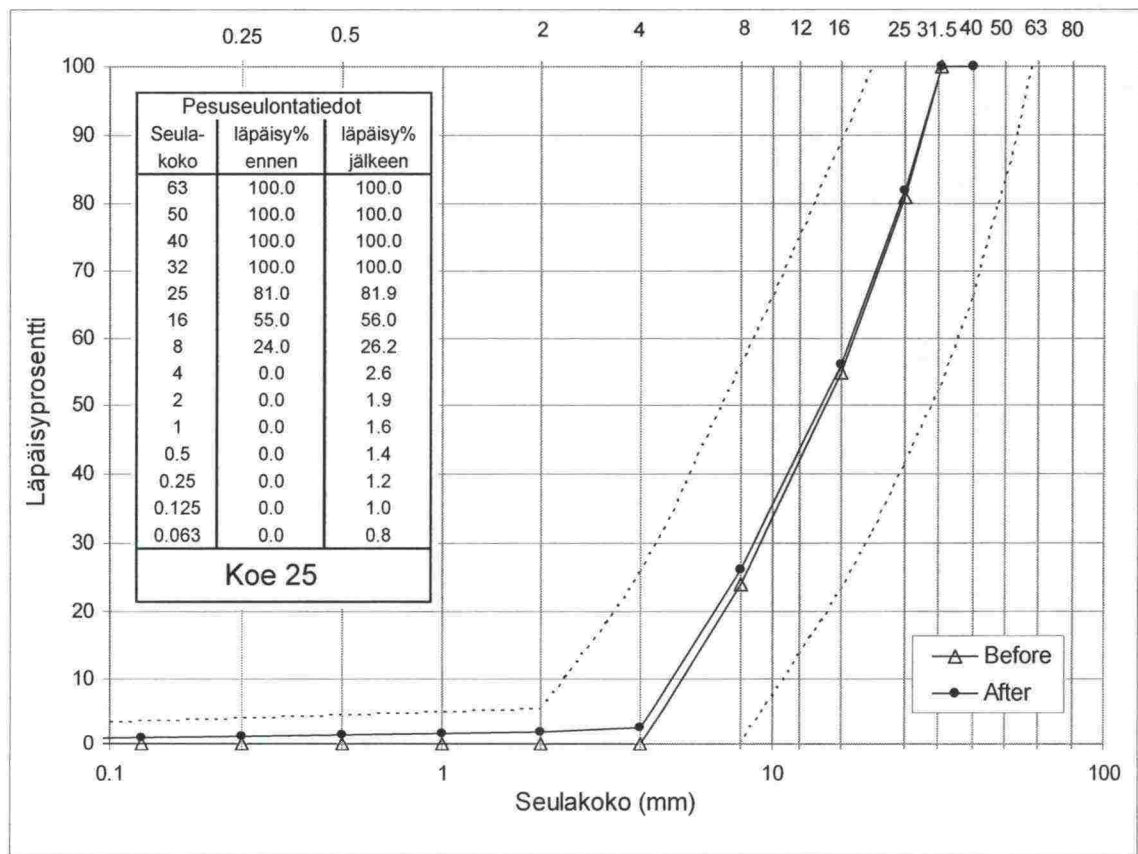


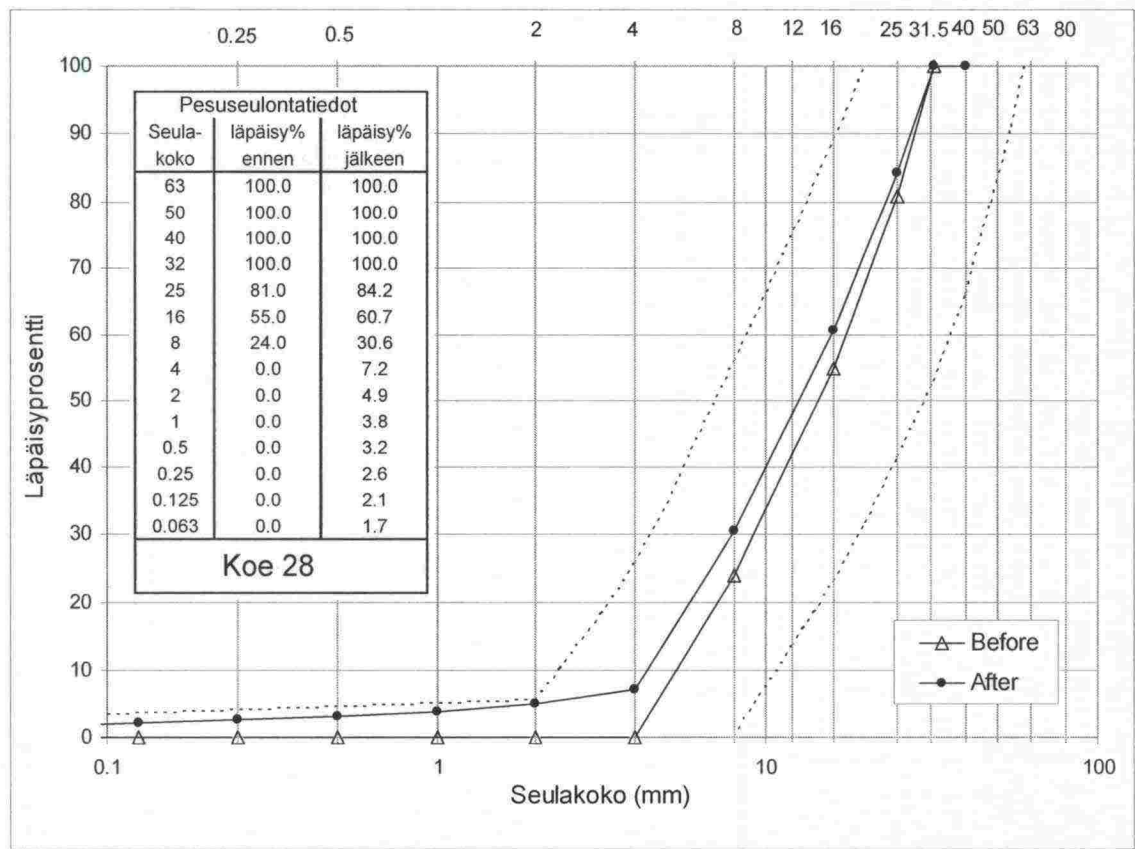
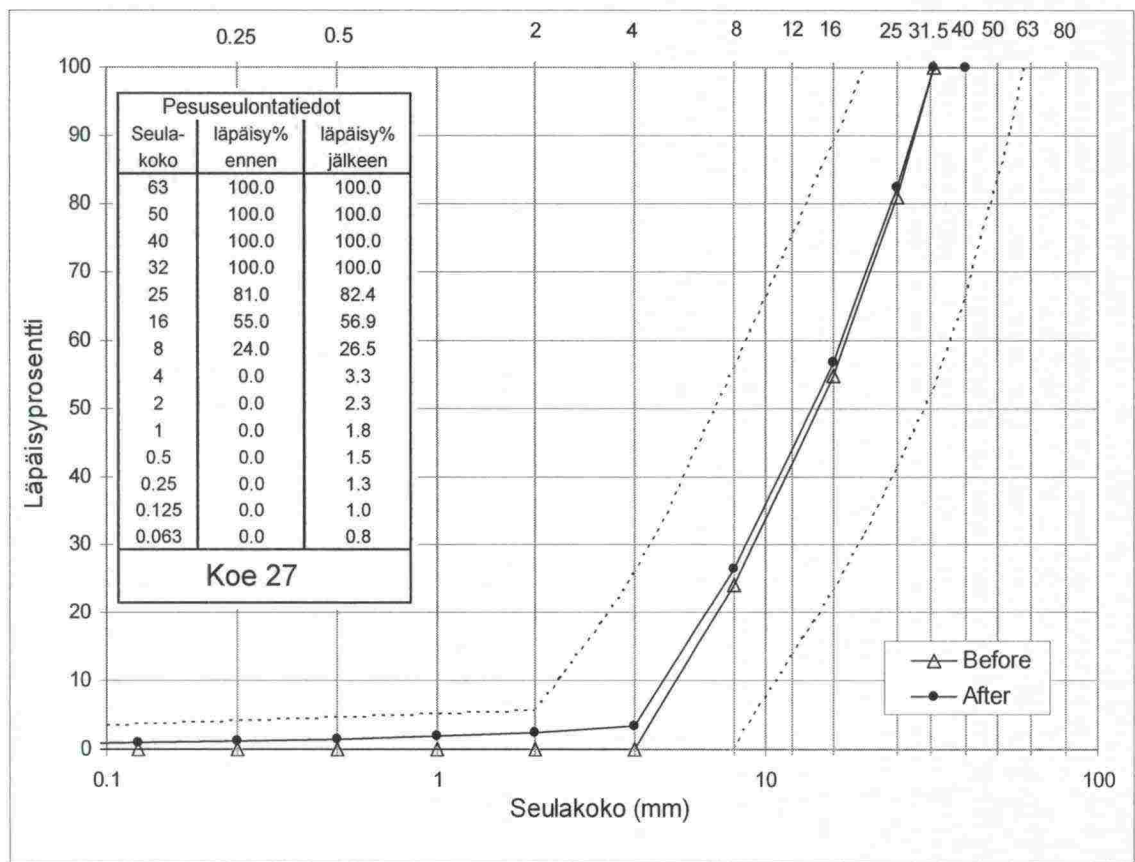


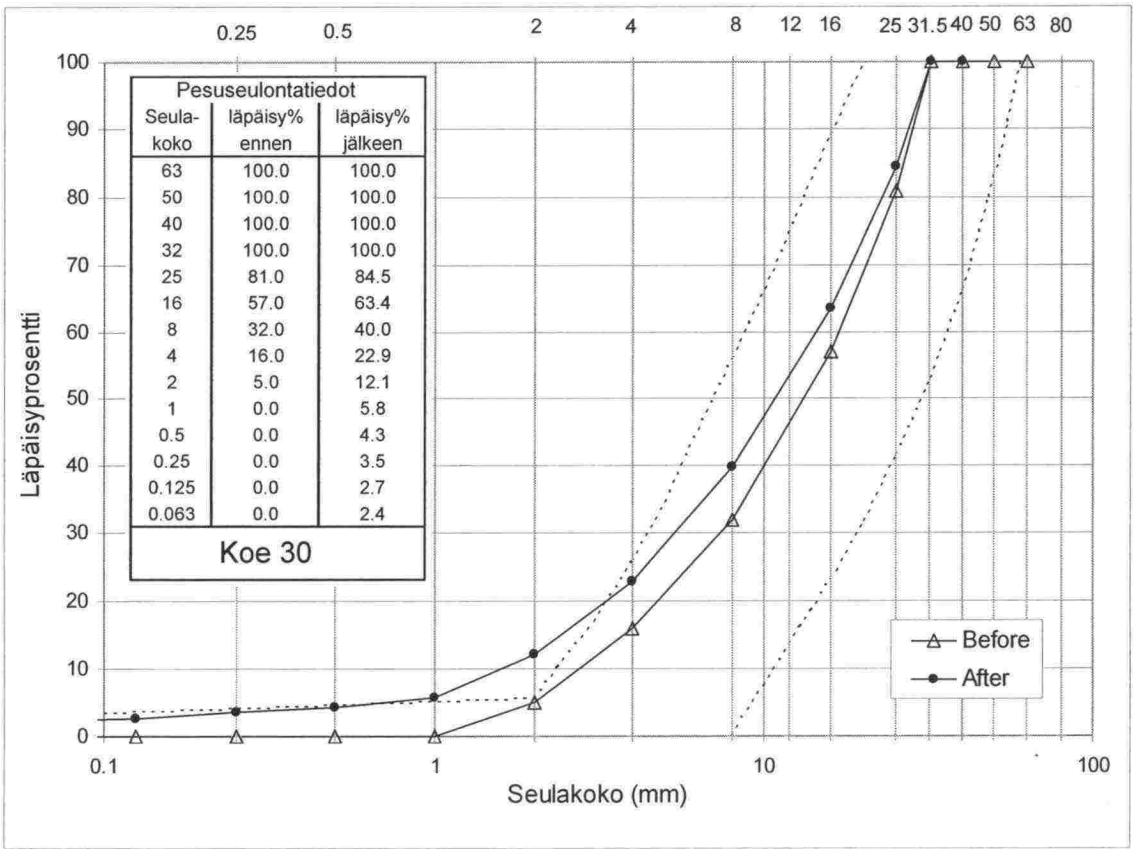
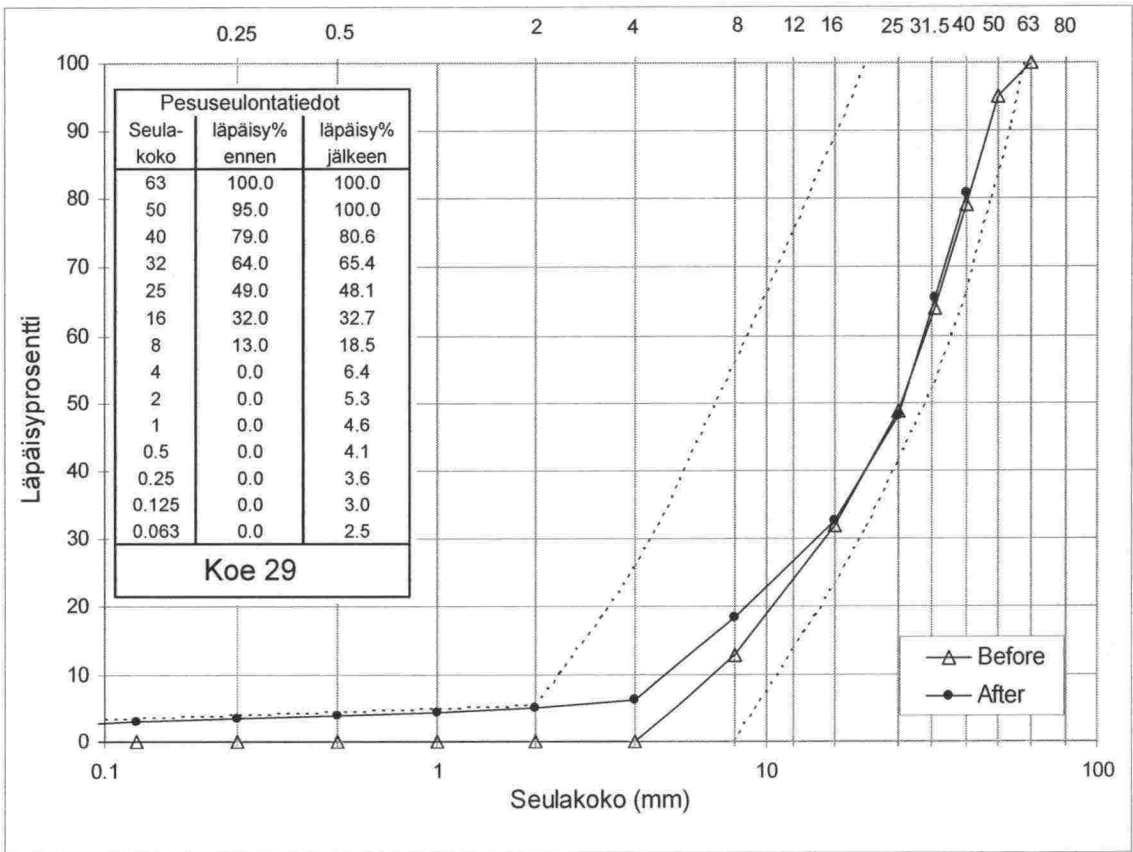


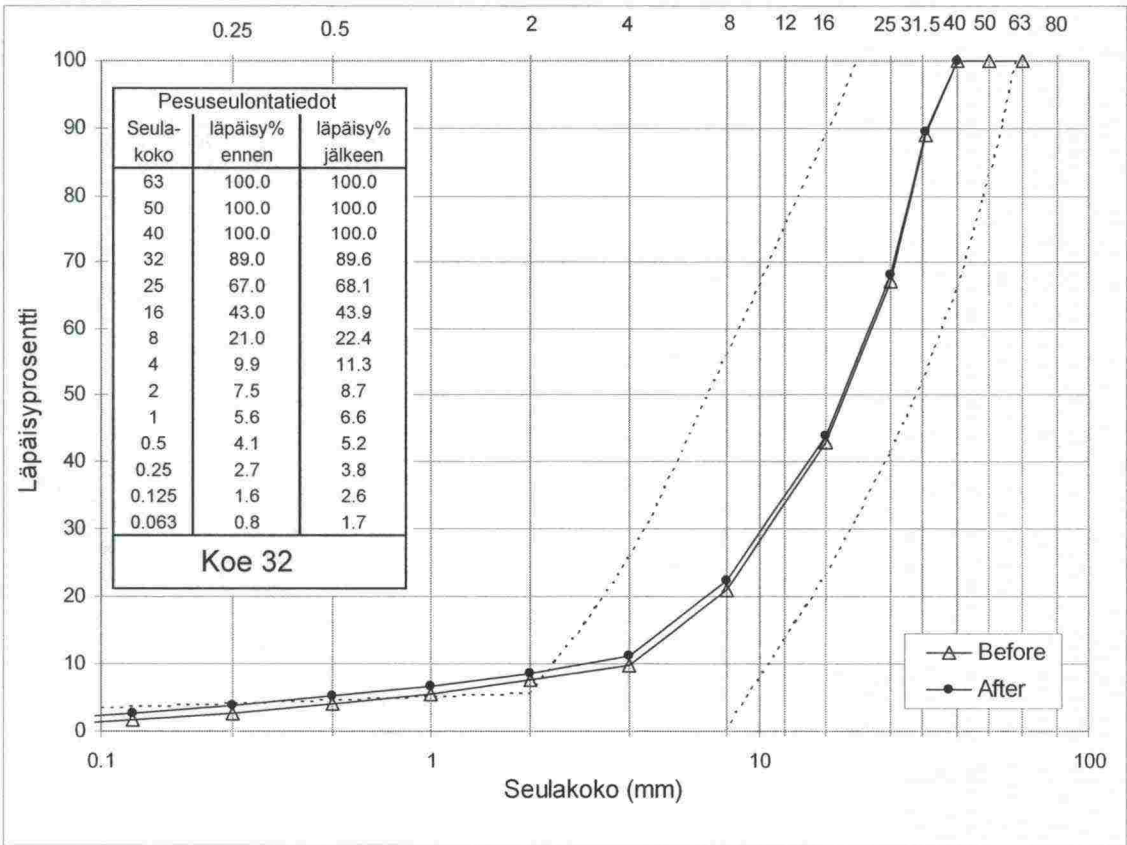
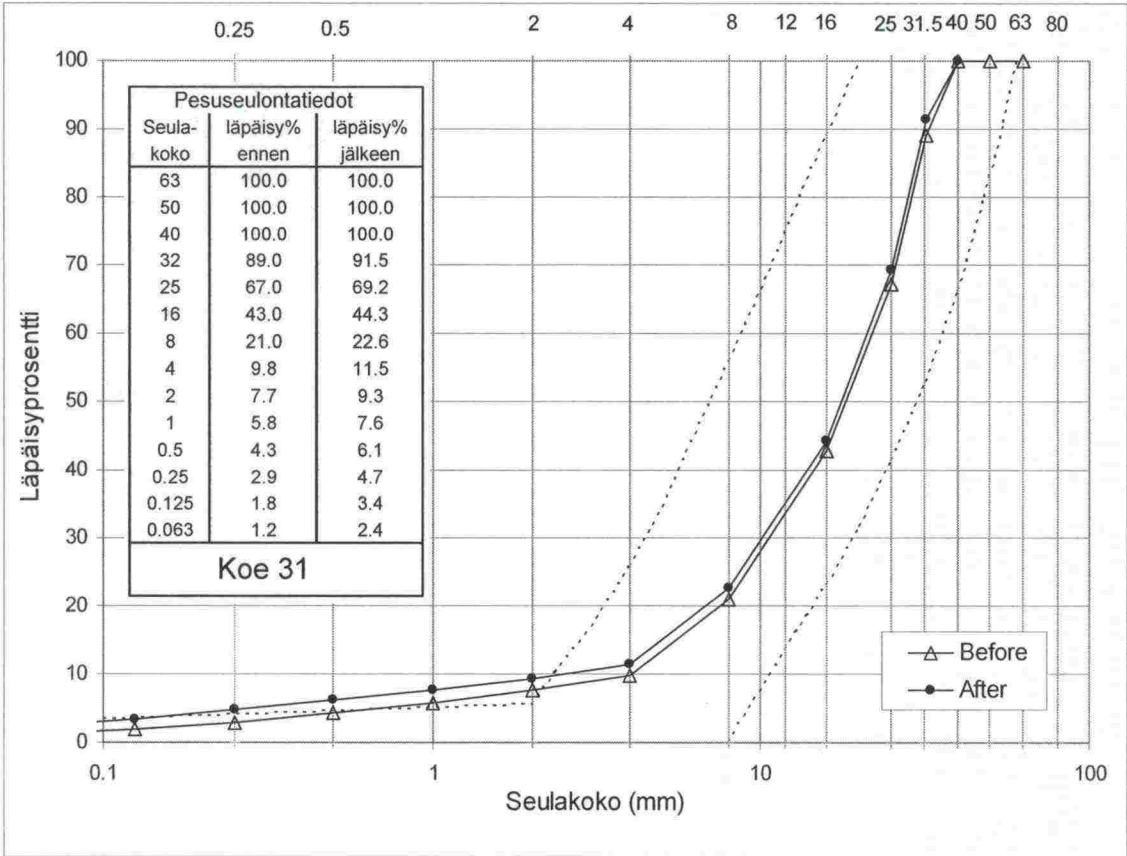


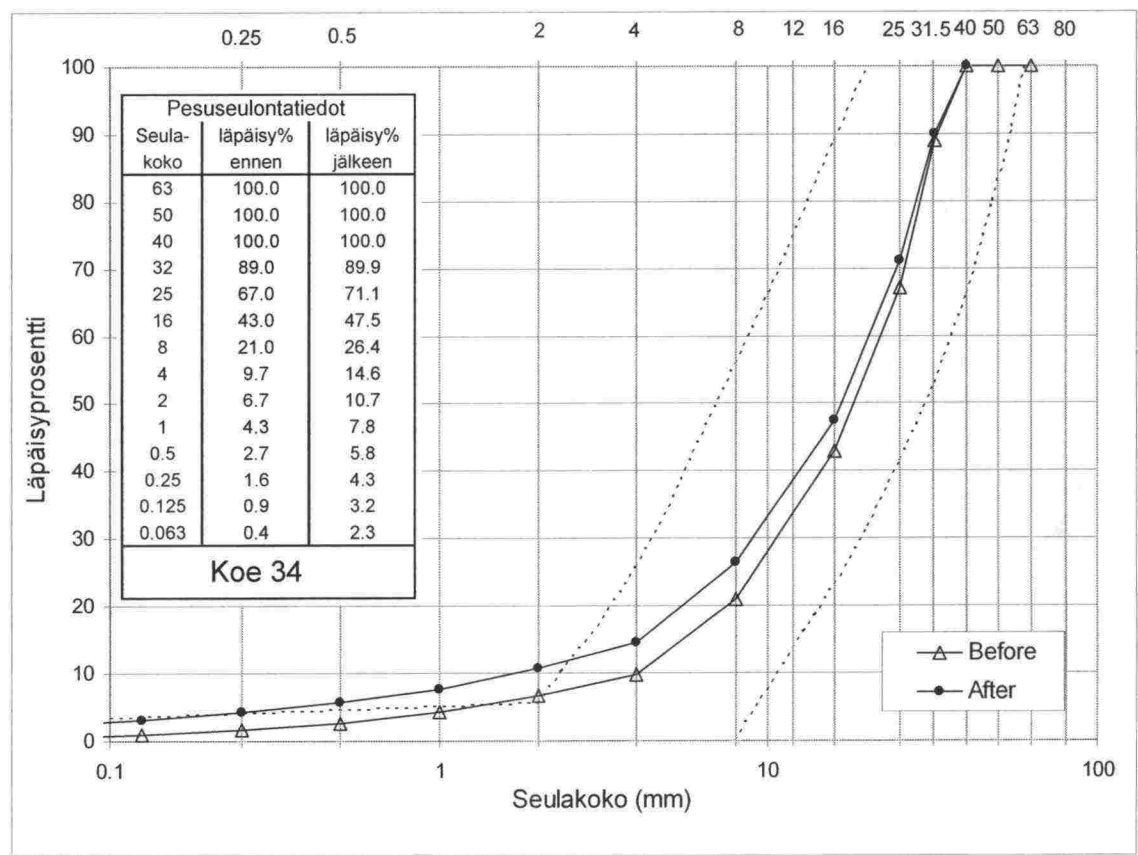
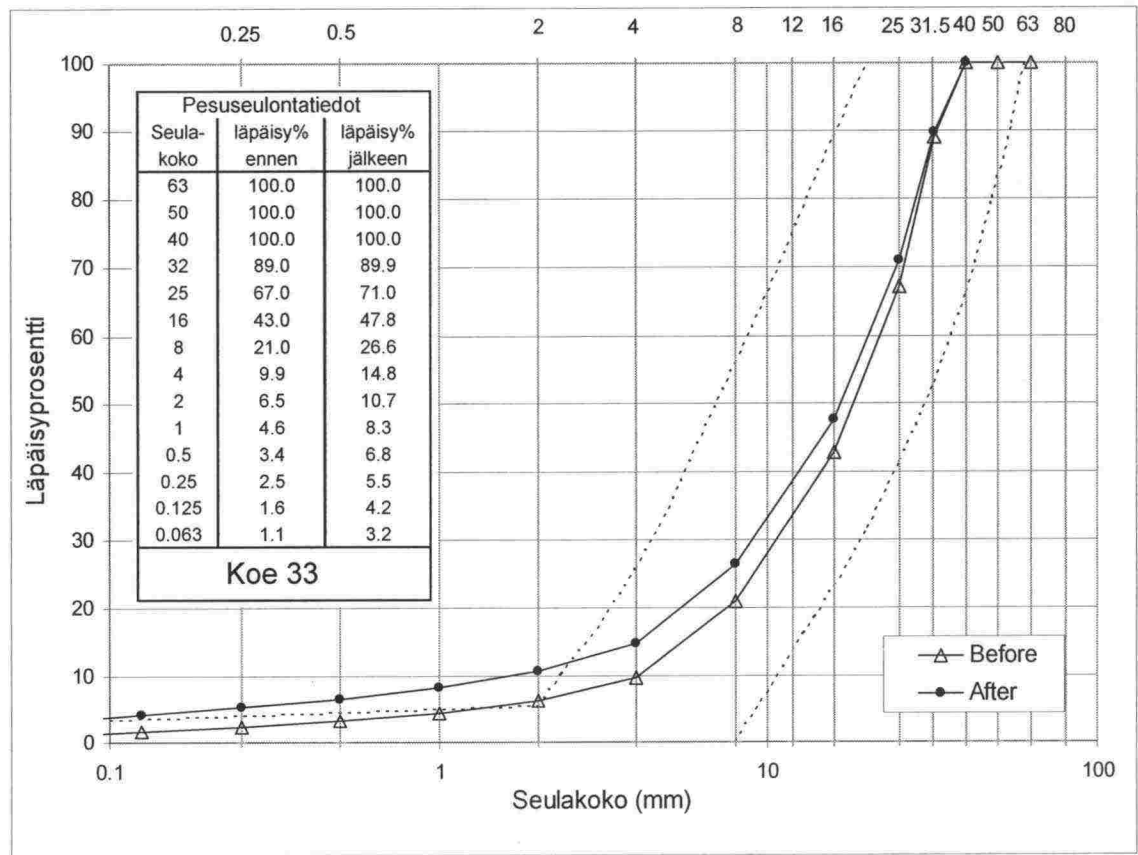


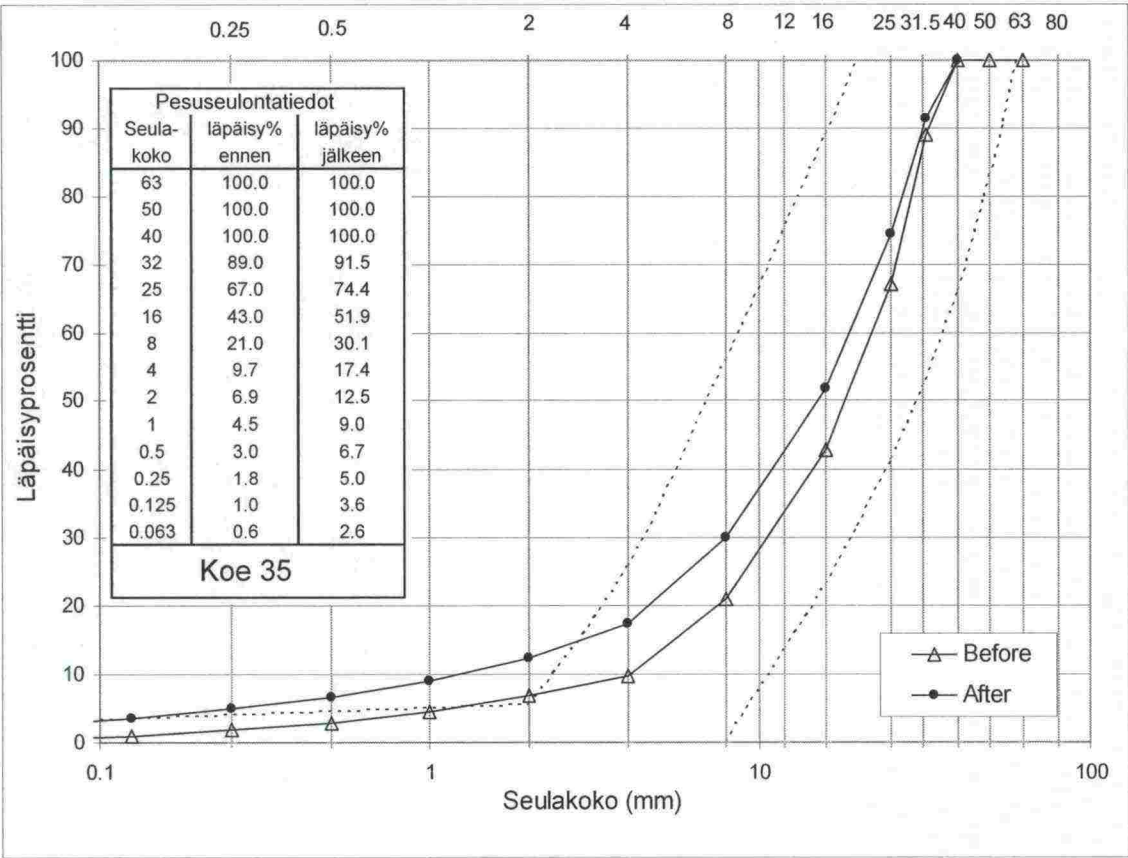












MATERIAALITIEDOT										TULOSPARAMETRIIT									
Koe nro	Runkokiviaines (jos ei oma)	Rakeisuus * ¹	Hienoinestyyppi * ²					Ensisijainen tarkastelun kohde											
			Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)		<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtoihyys (kg/dm ³)	h _{24h}	(h/Z) ^{24h}	V _{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h _{96h}	(h/Z) ^{96h}
1	km 50+700	A	x					10	144.	2.30	Toistettavuus	4.2	3.36	1.32	2.3	3.3	6.0	4.68	0.6
2	km 50+700	A	x					14	150.	2.30	Toistettavuus	4.0	3.32	1.73	3.0	4.4	6.2	5.05	0.7
3	km 50+700	A	x					11	149.	2.30	Toistettavuus	4.3	3.50	1.78	3.5	4.6	6.7	5.25	0.8
4	km 50+700	A	x					94	149.	2.30	Toistettavuus	4.2	3.38	1.81	3.8	5.0	6.6	5.12	0.8
5	km 50+700	B	x					14	150.	2.36	Tiivistys	6.2	4.78	2.13	3.7	5.1	8.5	6.26	0.8
6	km 50+700	B	x					26	149.	2.25	Tiivistys	7.1	6.00	3.48	3.8	7.9	10.7	8.43	1.2
7	km 50+700	B	x					11	149.	2.16	Tiivistys	6.5	5.46	3.56	3.7	7.3	10.0	7.49	1.1
8	km 50+700	B	x					39	150.	2.40	Tiivistys	6.1	5.12	2.56	4.0	7.1	8.8	7.00	0.9
9	Tmj-Raa 714+600	C	x					9	149.	2.25	Kiviaines	3.2	2.81	2.35	2.8	4.2	6.1	4.92	1.0
10	Tku-Tjl 260+300	C	x					28	150.	2.25	Kiviaines	5.2	4.70	4.13	3.1	5.8	9.0	7.29	1.3
11	Tku-Tjl 233+910	C	x					11	149.	2.26	Kiviaines	2.9	2.59	2.13	2.8	3.4	5.8	4.65	1.0
12	Kok-Oul 653+700	C	x					6	149.	2.26	Kiviaines	1.6	1.57	0.96	1.1	1.9	3.0	2.59	0.5
13	km 50+700	13		x				5	150.	2.26	<0.063mm määrä	1.7	1.55	0.72	1.0	1.9	2.3	2.02	0.2
14	km 50+700	14		x				12	150.	2.26	<0.063mm määrä	1.9	1.70	0.97	1.1	2.3	2.8	2.43	0.3

MATERIAALITIEDOT												TULOSPARAMETRIIT									
Koe nro	Runkokiviaines / hienoaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Hienoaainestyyppi *2								Ensisijainen tarkastelun kohde		h _{24h}	(h/Z) _{24h}	V _{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h _{96h}	(h/Z) _{96h}	V _{24-96h}	
			Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	> 0.063 mm (%)	<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtoilheys (kg/dm ³)										
15	km 50+700	15		x				6.0	3.2	51	149.	2.25	<0.063mm määrä	3.4	2.92	2.13	3.0	4.7	5.3	4.18	0.6
16	km 50+700	16		x				20.2	10.6	66	150.	2.26	<0.063mm määrä	9.2	8.10	7.30	12.0	14.5	18.7	13.9	3.2
17	km 50+700	17		x				2.2	1.2	57	149.	2.07	<0.063mm määrä	0.9	0.80	0.37	0.6	0.8	1.4	1.27	0.2
18	km 50+700	18		x				3.2	1.7	32	150.	2.12	<0.063mm määrä	1.3	1.28	0.96	1.4	1.5	2.6	2.39	0.4
19	km 50+700	19		x				4.0	2.1	86	149.	2.20	<0.063mm määrä	2.0	1.73	1.08	1.6	2.6	3.1	2.59	0.4
20	km 50+700	20		x				5.8	3.0	50	149.	2.25	<0.063mm määrä	2.3	2.07	1.47	1.7	3.4	3.8	3.17	0.5
21	km 50+700	D		x				5.5	2.9	10	148.	2.13	Tiivistys	2.4	2.24	1.43	1.3	2.6	3.9	3.44	0.5
22	km 50+700	D		x				5.7	3.0	30	149.	2.22	Tiivistys	3.0	2.73	1.39	1.4	3.2	4.4	3.60	0.4
23	km 50+700	D		x				5.9	3.1	50	148.	2.26	Tiivistys	3.2	2.98	1.61	1.7	3.7	4.9	4.28	0.5
24	km 50+700	D		x				6.2	3.3	0	149.	2.30	Tiivistys	2.8	2.55	1.65	1.7	4.0	4.6	4.03	0.6
25	Kok-Oul 699+990	D	x					7.1	3.7	*3	141.	2.40	Kiviaines	4.3	3.86	1.87	2.5	4.1	6.6	5.45	0.8
26	Kok-Oul 573+275	D	x					6.0	3.2	1	150.	2.26	Kiviaines	2.8	2.43	1.32	1.6	2.8	4.3	3.52	0.5
27	Vii-Sii 577+000	D	x					6.7	3.5	8	141.	2.39	Kiviaines	3.1	2.86	1.43	1.7	3.5	4.7	3.88	0.5

Routanousukokeet: koe- ja tulostiedot

MATERIAALITIEDOT													TULOSPARAMETRIIT												
Koe nro	Runkokivivaiaines / (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Hienoaainestyyppi					Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)	<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtohiheys (kg/dm³)	Ensisijainen tarkastelun kohde	h ^{24h}	(h/Z) ^{24h}	V ^{24h}	SP ^o	SP ^o (12-24h)	h ^{96h}	(h/Z) ^{96h}	V ^{24-96h}
28	Tku-Tjl 248+300	D	x	x								6.7	3.5	7	145.	2.33	Kiviaines	3.3	3.08	1.70	1.8	3.5	4.9	4.35	0.5
29	km 50+700 / Lakalaiva	D	x	x								5.8	2.8	0	152.	2.23	<0.063mm laatu	2.4	2.00	0.92	1.4	2.3	3.6	2.88	0.4
30	km 50+700 / Bentoniitti	D	x	x								5.7		2	161.	2.11	<0.063mm laatu	1.2	0.93	0.14	0.4	0.5	1.8	1.37	0.2
31	km 50+700 / Kvartsi	D	x	x								6.1	4.8	4	148.	2.29	<0.063mm laatu	2.8	2.34	1.48	2.3	3.4	4.7	3.83	0.6
32	km 50+700 / Maasälpä	D	x	x								5.6	4.0	6	149.	2.27	<0.063mm laatu	3.2	2.87	1.80	2.8	4.1	5.7	4.80	0.8
33	Kok-Oul 624+810	D	x	x								5.9	2.9	7	158.	2.19	Kiviaines	1.7	1.33	0.82	1.3	2.1	2.8	2.15	0.4
34	Kok-Oul 653+700	D	x	x								5.7	3.0	7	140.	2.47	Kiviaines	1.6	1.52	0.58	0.8	1.2	2.8	2.50	0.4
35	Tku-Tjl 233+910	D	x	x								5.8	3.1	1	146.	2.38	Kiviaines	2.2	1.86	0.85	1.5	2.4	3.4	2.83	0.4
36	Tku-Tjl 260+300	D	x	x								5.8	3.3	9	150.	2.31	Kiviaines	2.9	2.55	1.46	2.2	4.1	4.7	3.98	0.6
37	Säk-Joe 598+000	D	x	x								7.0	3.0	4	150.	2.32	Kiviaines	4.2	3.50	2.39	2.7	4.8	6.8	5.33	0.9
38	Kuo-Iis 495+780	D	x	x								5.9	2.9	0	147.	2.37	Kiviaines	2.9	2.51	1.37	1.8	3.0	4.7	3.93	0.6
39	Kuo-Iis 518+837	D	x	x								6.5	3.0	8	137.	2.53	Kiviaines	2.0	1.76	0.75	1.3	2.1	3.1	2.66	0.4
40	Kuo-Iis 538+720	D	x	x								6.3	3.1	0	145.	2.40	Kiviaines	2.5	2.28	1.36	1.4	2.8	4.1	3.54	0.5
41	Iis-Yvk 586+400	D	x	x								6.3	3.1	146.	2.43	2.43	Kiviaines	3.0	2.68	1.38	1.5	2.7	5.2	4.26	0.7

MATERIAALITIEDOT											TULOSPARAMETRIIT									
Koe nro	Runkokivivaines / hienovaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Od.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)	>0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtoilheys (kg/dm ³)	Ensisijainen tarkastelun kohde	h ^{24h}	(h/Z) ^{24h}	V ^{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h ^{96h}	(h/Z) ^{96h}	V ^{24-96h}
										0										
42	Iis-Yvk 664+600	D	x				6.1	3.0	8	155.	2.28	Kiviaines	2.7	2.24	1.22	1.4	3.1	4.2	3.31	0.5
43	Tmj-Raa 714+600	D	x				7.6	4.0	8	149.	2.37	Kiviaines	2.8	2.28	1.22	2.3	2.8	4.5	3.60	0.6
44	Tmj-Raa 703+170	D	x				7.3	3.4	4	151.	2.34	Kiviaines	3.8	3.38	1.97	2.6	4.4	6.2	5.03	0.8
45	Kok-Oul 624+810	E	x				3.3	1.6	7	159.	2.18	Kiviaines	1.0	0.81	0.47	0.8	0.9	1.6	1.25	0.2
46	Tku-Tjl 260+300	D	x				5.5	3.1	3	151.	2.32	Kiviaines	3.5	3.02	1.74	2.5	4.1	5.7	4.61	0.7
47	Tku-Tjl 233+910	D	x				5.4	2.9	4	148.	2.39	Kiviaines	2.2	1.85	0.78	1.2	2.1	3.1	2.57	0.3
48	Kok-Oul 653+700	D	x				5.5	2.9	5	143.	2.47	Kiviaines	1.6	1.49	0.62	1.2	1.6	2.5	2.26	0.3
49	km 50+700	D		x			5.7	3.0	7	154.	2.20	Paloiteltu putki	2.5	2.12	1.44	1.7	2.9	4.2	3.35	0.6
50	km 50+700	D		x			5.7	3.0	3	151.	2.24	Umpiputki	1.0	0.84	0.72	1.6	1.7	1.9	1.57	0.3
51	km 50+700	B		x			10.5	5.5	6	151.	2.28	Paloiteltu putki	5.1	4.08	2.17	3.0	6.1	7.5	5.65	0.8
52	km 50+700	B		x			10.5	5.5	5	151.	2.28	Umpiputki	1.3	1.10	1.10	1.9	2.4	2.8	2.31	0.5
53	km 50+700	E		x			3.1	1.6	3	150.	2.22	<0.063mm laatu	1.4	1.13	0.86	1.4	1.4	2.6	2.09	0.4
54	km 50+700 / Bentoniitti	D	x				5.7		6	150.	2.10	<0.063mm laatu	1.7	1.40	0.49	0.6	1.1	2.3	1.86	0.2

Routanousukokeet: koe- ja tulostiedot

Koe nro	MATERIAALITIEDOT		Hienoainestyyppi #2										TULOSPARAMETRIIT							
	Runkokiviaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)	<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtohiety (kg/dm³)	Ensisijainen tarkastelun kohde	h _{24h}	(h/Z) _{24h}	V _{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h _{96h}	(h/Z) _{96h}	V _{24-96h}
55	km 50+700 / Kvartsi	D	x				5.9	4.6	150.	2	2.26	<0.063mm laatu	2.7	2.23	1.61	2.9	3.3	4.9	3.95	0.7
56	km 50+700 / Maasälpä	D	x				5.8	4.2	2	2	2.26	<0.063mm laatu	3.2	2.74	1.53	2.2	3.4	5.7	4.61	0.8
57	Säk-Joe 598+000	D		x			6.7	2.8	148.	6	2.34	Kiviaines	3.6	3.14	2.01	3.1	3.7	6.3	5.30	0.9
58	Tmj-Raa 703+170	D		x			7.2	3.3	150.	9	2.34	Kiviaines	3.7	3.03	1.64	2.3	3.6	6.4	4.98	0.9
59	Vii-Sii 541+920	D		x			6.7	3.5	145.	0	2.40	Kiviaines	2.3	1.97	1.33	2.3	2.4	4.1	3.28	0.6
60	Vii-Sii 663+830	D		x			6.1	3.2	147.	4	2.36	Kiviaines	2.7	2.43	1.41	2.0	3.0	4.7	4.02	0.7
61	km 50+700	61			x		2.0	1.1	144.	9	2.15	Rakeisuuskäyrä	1.1	0.98	0.54	0.9	1.1	2.0	1.72	0.3
62	km 50+700	New			x		2.1	1.1	155.	8	2.07	Rakeisuuskäyrä	0.9	0.80	0.47	0.7	0.9	1.7	1.53	0.3
63	km 50+700	63			x		2.1	1.1	151.	8	2.16	Rakeisuuskäyrä	1.1	0.98	0.45	0.8	1.1	1.9	1.65	0.3
64	km 50+700	F			x		15.2	8.0	142.	4	2.38	<0.063mm määrä	5.7	4.75	2.74	4.7	6.5	9.5	7.14	1.3
65	Lakalaiva	New			x		1.7	0.8	144.	0	2.16	<0.063mm määrä	0.8	0.79	0.41		0.8			
66	Lakalaiva	D			x		5.2	2.6	144.	4	2.33	<0.063mm määrä	2.7	2.56	1.67		2.5			
67	Lakalaiva	E			x		3.0	1.5	143.	8	2.32	<0.063mm määrä	1.8	1.56	0.97		1.7			
68	Lakalaiva	F			x		14.4	7.1	147.	2.33	2.33	<0.063mm määrä	7.1	6.10	3.89		8.7			

MATERIAALITIEDOT										TULOSPARAMETRIIT										
Koe nro	Runkokiviaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Hienoainestyyppi *2					Ensisijainen tarkastelun kohde	TULOSPARAMETRIIT											
			Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	> 0.063 mm (%)		<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtohiety (kg/dm ³)	h ^{24h}	(h/Z) ^{24h}	V ^{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h ^{96h}	(h/Z) ^{96h}	V ^{24-96h}
									0											
71	km 50+700 /Toistokuorm.koe	D		x					147.	3	2.29	<0.063mm laatu	3.5	2.78	2.30	4.2	4.5	6.6	4.96	1.0
72	km 50+700 / Toistokuorm.koe	D		x					148.	3	2.27	<0.063mm laatu	6.8	5.85	4.10	5.6	8.2	12.5	9.77	1.9
73	km 50+700 / Toistokuorm.koe	D		x					152.	2	2.23	<0.063mm laatu	7.6	6.38	4.24	5.6	8.8	13.3	2	1.9
74	Kvartsi: kokonaan <0.063mm		x						156.	2	1.62	Vain hienoaainesta	21.1	6	8.74		22.6			10.3
75	km 50+700 / Toistokuorm.koe	D		x					150.	7	2.25	<0.063mm laatu	3.0	2.64	2.02	2.6	3.5	5.7	4.61	0.9
	T.kuorm.koe14: kokonaan			x					153.	6	1.38	Vain hienoaainesta	20.9	13.5					35.5	
76	<0.063mm			x					147.	5	2.19	<0.063mm määrä	1.0	0.86	0.44	0.7	1.0	2.0	1.71	0.4
77	km 85+600	New		x					147.	0	2.35	<0.063mm määrä	3.4	3.09	2.14	3.1	3.7	6.5	5.56	1.0
78	km 85+600	D		x					148.	4	2.33	<0.063mm määrä	2.0	1.64	1.17	2.2	2.6	3.6	2.84	0.5
79	km 85+600	E		x					143.	8	2.40	<0.063mm määrä	4.7	4.24	2.76	3.8	5.3	8.4	7.10	1.2
80	km 85+600	B		x						x	x	<0.063mm määrä	0.6	0.55	0.47	0.4	0.6	1.1	0.98	0.2
81	Lakalaiva	New		x					149.	3	2.33	<0.063mm määrä	2.2	1.83	1.53	1.7	2.3	4.2	3.34	0.7
82	Lakalaiva	D		x					149.	4	2.33	<0.063mm määrä	1.9	1.55	1.19	1.9	2.2	3.9	3.11	0.7
83	Lakalaiva	E		x						4	2.33	<0.063mm määrä								

Routanousukokeet: koe- ja tulostiedot

MATERIAALITIEDOT											TULOSPARAMETRIIT											
Koe nro	Runkokiviaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Hienoainestyyppi *2						Ensisijainen tarkastelun kohde					h _{24h}		(h/Z) _{24h}	V _{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h _{96h}	(h/Z) _{96h}	V _{24-96h}
			Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	> 0.063 mm (%)	<0.02 mm (%)	Tiivistyskiertoksia	Korkeus (mm)	Irtohiyys (kg/dm ³)	3	2.32	<0.063mm määrä	3.7	3.13	2.20	3.0	4.9	6.6	5.10	1.0
84	Lakalaiva	B		x					151.													
85	km 50+700	D		x					152.													
86	km 50+700	G		x					161.													
87	km 50+700	H		x					159.													
88	km 50+700	D		x					152.													
89	km 88+200	New		x																		
90	km 88+200	D		x																		
91	km 88+200	E		x																		
92	km 88+200	B		x																		
93	km 80+500	D		x																		
94	km 80+500	D		x																		
95	km 80+500	D		x																		
96	km 80+500	D		x																		
97	km 87+500	New	x																			
98	km 87+500	D	x																			
99	km 87+500	E	x																			

MATERIAALITIEDOT		Hienoainestyyppi *2										TULOSPARAMETRIIT									
Koe nro	Runkokiviaines hienoaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)	<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtoliheys (kg/dm³)	Ensisijainen tarkastelun kohde	h _{24h}	(h/Z) _{24h}	V _{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h _{96h}	(h/Z) _{96h}	V _{24-96h}	
100	km 87+500	B	x				10.8	6.2	5 151.	4	2.28	<0.063mm määrä	4.0	3.33	1.70	2.1	3.9	6.2	4.97	0.7	
101	Kankaanpää hiekka	Nat	x				23.1	5.6	148.	4	1.74	Maalaji	4.9	4.37	1.90	2.3	5.2	6.8	5.03	0.6	
102	Vesanka hiekka	Nat*	x				8.5	6.3	142.	6	2.18	Maalaji	7.4	6.15	4.73	7.4	8.2	14.2	10.9	2.3	
103	Kuo-Iis 518+837	H		x			6.1	2.8	139.	8	2.43	Lajitteet 0.063-0.25 mm	1.2	1.09	0.70	0.9	1.4	2.1	1.82	0.3	
104	km 50+700 / Säk-Joe	D		x			5.7	2.4	153.	8	2.21	Karkeat rakeet	1.7	1.43	0.90	1.3	1.8	2.8	2.26	0.4	
105	km 50+700 / Kankaanpää hiekka	D		x			5.7	1.3	153.	7	2.21	Karkeat rakeet	1.1	0.87	0.47	0.8	1.0	1.6	1.27	0.2	
106	km 50+700 / Vesanka hiekka	E		x			3.3	1.7	157.	1	2.16	Karkeat rakeet	1.6	1.25	0.90	1.3	1.8	2.9	2.21	0.4	
107	km 50+700 / Iis-Yvk 586+400	D		x			5.7	2.8	152.	9	2.22	Karkeat rakeet	1.9	1.53	0.84	1.4	2.1	3.1	2.48	0.4	
108	km 50+700 / km 87+500	D		x			5.7	3.2	154.	7	2.19	Karkeat rakeet	2.0	1.62	0.75	1.2	1.9	3.1	2.55	0.4	
109	Vesanka hiekka / km 50+700	Nat*		x			7.6	4.0	150.	8	2.15	Karkeat rakeet	5.8	5.08	4.82	4.3	6.6	10.4	7.35	1.5	
110	km 50+700 / Vesanka, koe 102:sta	A	x				7.5	5.6	146.	8	2.29	Karkeat rakeet	5.2	4.97	5.96	4.3	6.0	11.0	8.58	1.9	
111	km 50+700	=102		x			9.1	4.8	162.	0	2.01	Rakeisuuskäyrä	2.9	2.59	2.59	2.4	4.6	6.5	4.46	1.2	
112	Tpe-Orv 194+080/E	Nat*	x				6.0	4.5	149.	0	2.23	Kiviaines	2.9	2.93	4.23	2.6	4.0	6.7	5.10	1.3	

Routanousukokeet: koe- ja tulostiedot

Koe nro	MATERIAALITIEDOT										TULOSPARAMETRIIT									
	Runkokivivaaines (jos ei oma)	Rakeisuus * ¹	Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)	<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtohiheys (kg/dm ³)	Ensisijainen tarkastelun kohde	h ^{24h}	(h/Z) ^{24h}	V ^{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h ^{96h}	(h/Z) ^{96h}	V ^{24-96h}
113	Kon-Oul välikerroshiekka	849, Nat	x				0.8	0.2	156. 2	1.83	Maalaji		0.3	0.31	0.21	0.3	0.3	0.9	0.70	0.2
114	Orv-Jmk 248, välikerrossora	Nat* x					2.8	1.3	157. 8	2.16	Maalaji		2.7	2.02	1.56	2.3	3.0	4.9	3.48	0.7
115	Kon-Var 710, välikerrossora	Nat x					2.7	0.9	155. 4	2.20	Maalaji		1.7	1.34	1.02	1.7	1.9	3.1	2.38	0.5
116	Pmk-Kuo 402, välikerrossora	Nat x					1.8	0.3	161. 3	2.12	Maalaji		0.9	0.64	0.49	1.1	0.9	1.6	1.11	0.2
117	km 50+700 / 806+250 kuiv.	Oul-Lau D		x			5.7	3.5	154. 1	2.20	Karkeat rakeet		2.6	2.20	1.41	1.9	3.0	4.5	3.58	0.6
118	km 50+700 / 806+250 tod.	Oul-Lau D	x				5.7	3.8	153. 9	2.21	Kiinnittynyt hienoaines		2.2	1.85	0.87	1.5	2.2	3.5	2.81	0.4
119	km 50+700 / 866+250 kuiv.	Lau-Rov D		x			5.5	3.0	155. 8	2.18	Karkeat rakeet		2.3	1.75	1.13	2.0	2.3	4.0	3.00	0.6
120	km 50+700 / 866+250 tod.	Lau-Rov D	x				5.5	3.8	154. 7	2.20	Kiinnittynyt hienoaines		2.7	2.09	1.30	2.1	3.4	4.5	3.38	0.6
121	Tor-Kol 999+300	D Nat*	x				5.8	3.1	154. 0	2.26	Kiviaines		2.3	1.93	1.42	2.0	2.9	4.2	3.29	0.6
122	Kon-Tai 665, raidesora	* x					0.7	0.2	156. 0	2.08	Maalaji		0.7	0.53	0.59	0.9	0.8	1.3	0.99	0.2
123	Vesilahti sora	Nat* x					4.7	3.0	141. 7	2.31	Maalaji		8.4	6.76	3.85	6.1	8.4	12.8	9.83	1.5
124	Tor-Kol 920+180	D x		x			6.0	4.0	138. 2	2.52	Kiviaines		5.9	4.97	2.45	4.2	5.8	8.8	7.20	1.0
125	Tor-Kol 920+180, pesu	D x			x		5.0	4.6	142. 2	2.56	Kiinnittynyt hienoaines		5.8	4.47	2.09	4.3	5.8	8.6	6.41	0.9
126	Kon-Var 680&710	~D x					4.9	2.8	150. 2	2.26	Kiviaines		1.8	1.41	0.95	1.7	2.1	3.3	2.50	0.5

Routanousukokeet: koe- ja tulostiedot

MATERIAALITIEDOT										TULOSPARAMETRIIT										
Koe nro	Runkokiviaines (jos ei oma)	Rakeisuus *1	Hienoainestyyppi *2					Ensisijainen tarkastelun kohde	Tulosparametrit											
			Tod.	Pääosin kuiv.	Kuiv.	Pesu	< 0.063 mm (%)		<0.02 mm (%)	Tiivistyskierroksia	Korkeus (mm)	Irtotihveys (kg/dm ³)	h _{24h}	(h/Z) _{24h}	V _{24h}	SP _o	SP _o (12-24h)	h _{96h}	(h/Z) _{96h}	V _{24-96h}
127	Pmk-Kuo 402+470	~D	x			4.7	2.6	58.	158.	2.22	Kiviaines	1.9	1.45	1.10	2.0	2.1	3.7	2.78	0.6	
128	Oul-Lau 756+170	~D	x			5.8	3.9	6	143.	2.40	Kiviaines	3.9	3.10	2.17	3.9	4.9	6.1	4.75	0.7	
129	Kon-Tai 665, raidesora	Nat*	x			3.3	1.1	3	155.	2.13	Maalaji	1.2	0.95	0.88	1.4	1.7	2.2	1.67	0.3	
130	Oul-Lau 806+250	D	x			5.7	3.8	3	146.	2.40	Kiviaines	2.6	2.04	1.30	2.7	2.9	4.1	3.21	0.5	
131	Lau-Rov 866+250	D	x			5.7	3.9	3	158.	2.22	Kiviaines	3.6	2.66	1.70	2.9	4.5	6.2	4.40	0.9	
132	km 50+700	~16		x		21.5	11.3	4	145.	2.32	<0.063mm määrä	9.4	7.34	4.55	7.6	9.3	15.1	11.0	7	1.9

*¹ Ks. liitteessä 6 esitetyt rakeisuuskäyrät

Nat = materiaalin luonnollinen raekokojakautuma

Nat* = materiaalin luonnollinen raekokojakautuma, josta poistettu >31.5 mm rakeet

Nat** = materiaalin luonnollinen raekokojakautuma, josta poistettu hienoaaines

New = uuden EV-kerrosmurskeen raekokojakautumaa mukaileva rakeisuus (ks. rakeisuuskäyrät)

*² Hienoaainestyyppi:

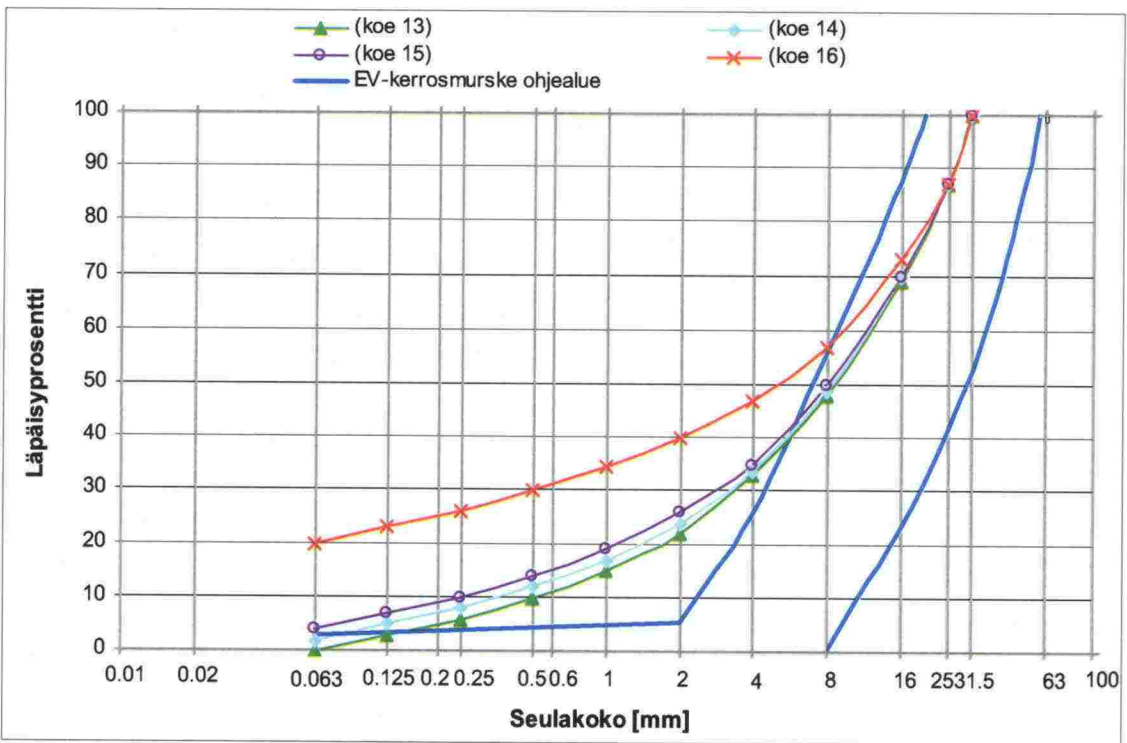
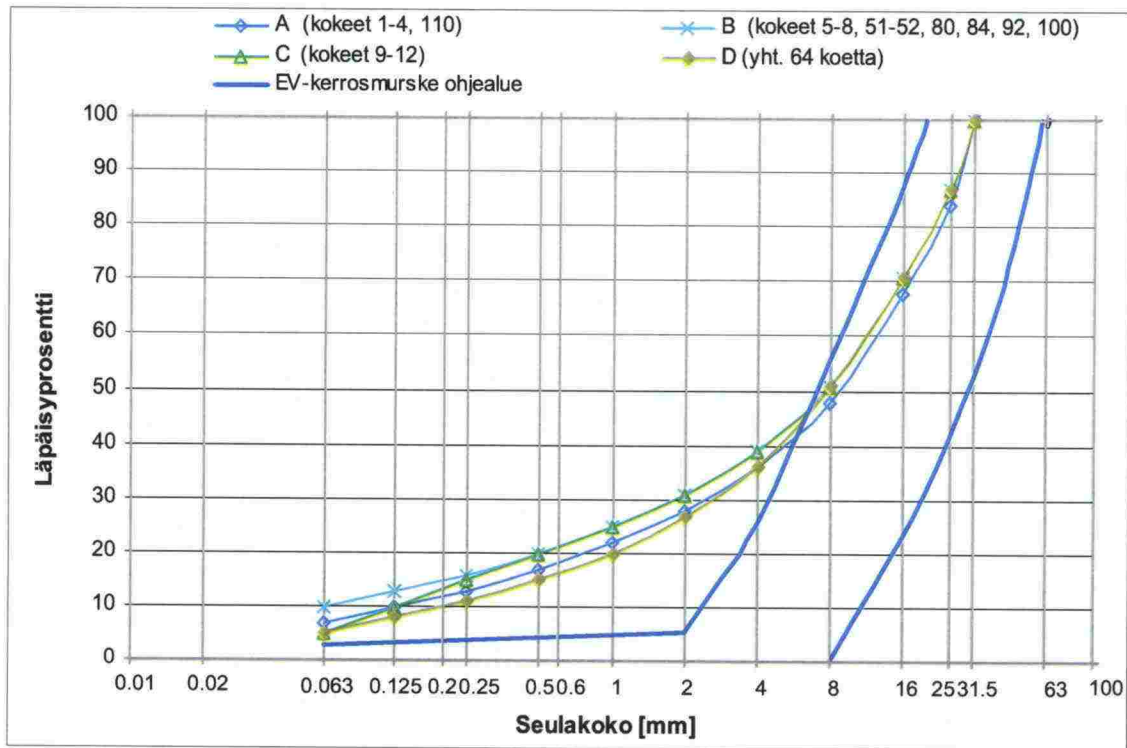
Tod. = todellinen hienoaaines kiviaineksessa sisältäen sekä kuivaseulonnassa että sen jälkeisessä pesussa irtoavan aineksen (rakeita ei pesty ennen koetta)

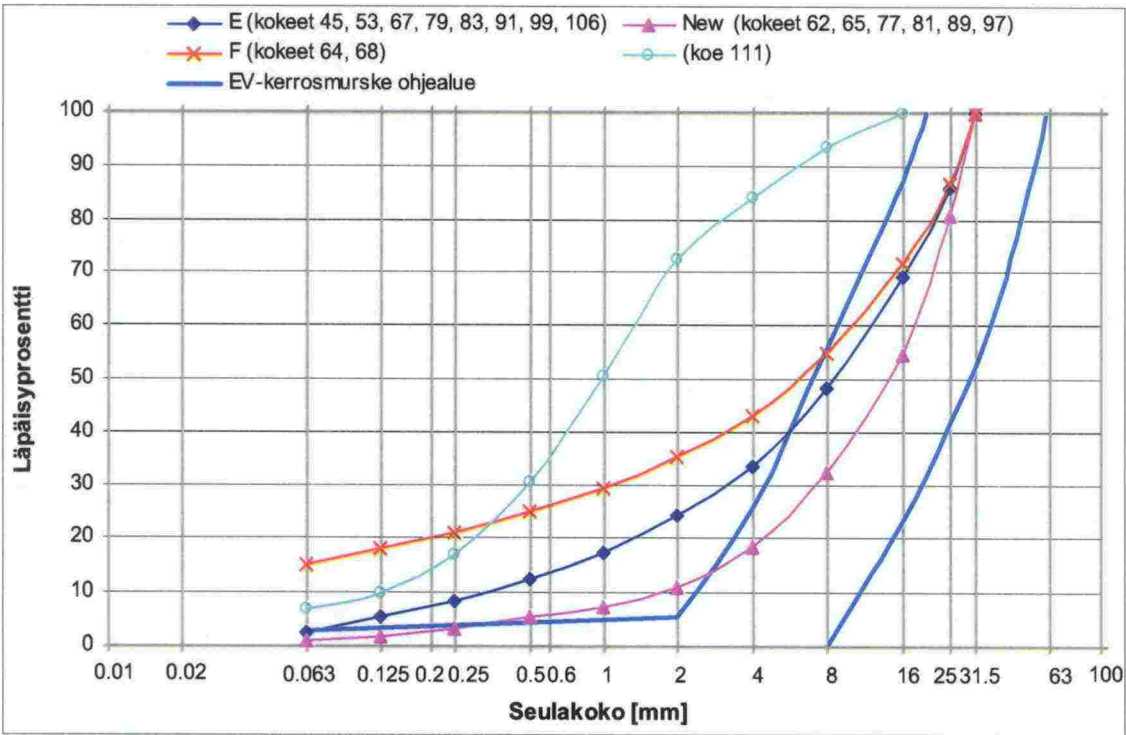
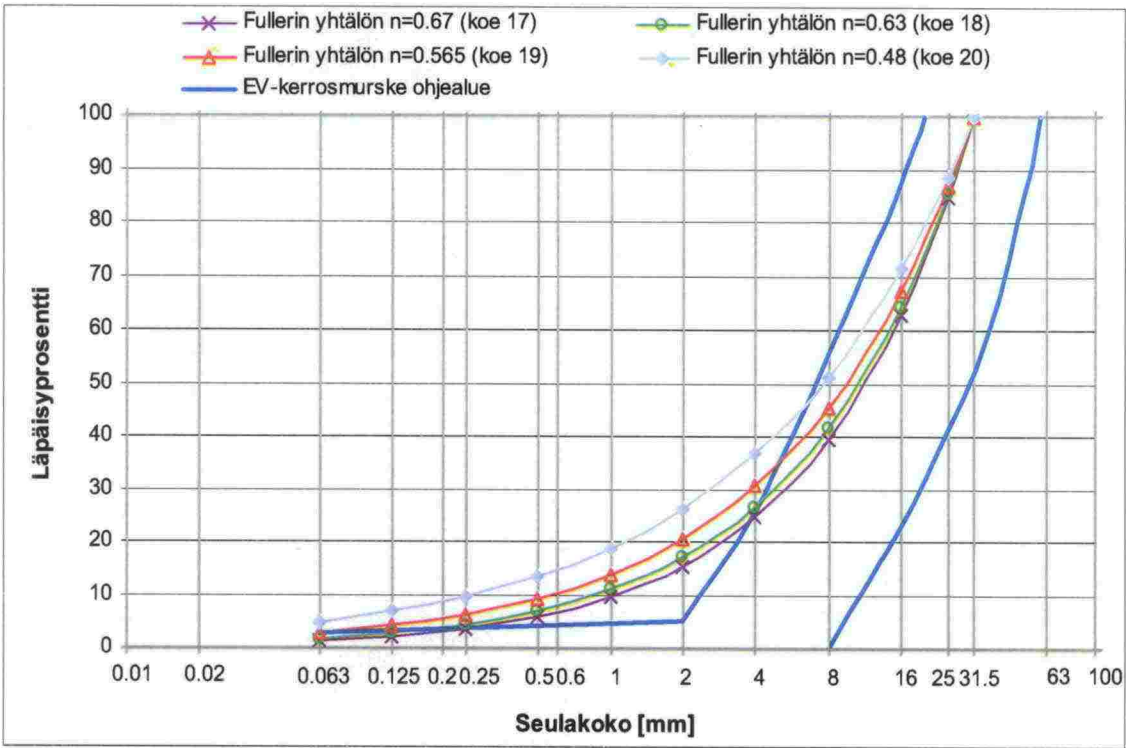
Pääosin kuiv. = pääosa hienoaineksesta on kuivaseulonnassa irtoavaa hienoaainesta (seulonnan jälkeisessä pesussa hävinnyttä ainesta ei juurikaan mukana)

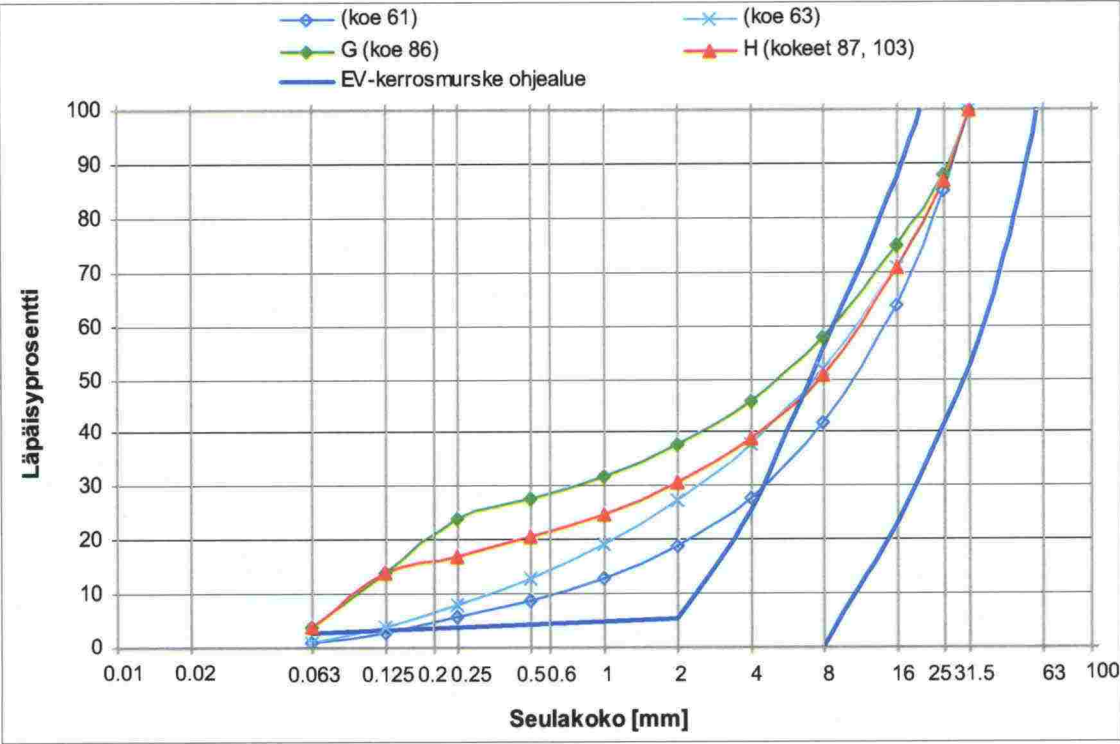
Kuiv. = hienoaaines on kuivaseulonnassa irronnutta ainesta (seulonnan jälkeen materiaalin pinnoille jäänyt aines on hävinnyt pesussa)

Pesu = hienoaaines on kuivaseulonnan jälkeisessä pesussa irronnutta ainesta

*³ ICT-laitteen kierrosmäärä näytteen tiivistyksessä vakioitiin kokeen 24 jälkeen 50 kierrokseen







RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2002 Ratarakenteen routasuojaus
- 3/2002 Rautatietasoristeysten turvaamis- ja poistostrategia 2020
- 4/2002 Rautateiden maanvaraiset pylväasperustukset, lisensiaatintutkimus
- 5/2002 Raiteentarkastus ja siinä ilmenevien virheiden analysointi välillä
Kirkkonummi–Turku
- 6/2002 Kerava–Lahti-oikoradan sosiaalisten vaikutusten arviointi
- 7/2002 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2025
- 8/2002 Puomillisten tasoristeysten turvallisuus
- 9/2002 Vartioimattomien tasoristeysten turvallisuus
- 10/2002 Ratarumpututkimus, mallinnus
- 1/2003 Katsaus Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoimintaan
- 2/2003 Instrumentation and Modelling of Railway Culverts
- 3/2003 Rautatieliikenteen onnettomuuksien ja vaaratilanteiden raportoinnin
kehittäminen
- 4/2003 Henkilöliikenneasemien esteettömyyskartoituksen tuloksia
- 1/2004 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025
- 2/2004 Rautateiden kaukoliikenteen asemien palvelutaso ja kehittämistarpeet
- 3/2004 Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset
- 4/2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan
rakennekerroksissa
- 5/2004 Radan kulumisen rajakustannukset vuosina 1997–2002
- 6/2004 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2002
- 7/2004 Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun tila
- 8/2004 Stabiiliteetiltaan kriittiset ratapenkereet, esitutkimus
- 9/2004 Ratapenkereitten leveys ja luiskakaltevuus, esitutkimus
- 10/2004 Lähtökohtia ratapihojen kapasiteetin mittaamiseen
- 1/2005 Sähköratamaadoituksien perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja
laiturirakenteet
- 2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen
selvitys
- 3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
- 4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- 2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
- 3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja
Hämeenlinnan rautatieasemilla
- 4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
- 5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated
loading. Literature review
- 6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
- 7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
- 8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus



**RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:

Ratahallintokeskus

Keskuskatu 8, PL 185, 00101 Helsinki

puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100

www.rhk.fi

ISBN 952-445-159-x (nid.)

ISBN 952-445-160-3 (pdf)

ISSN 1455-2604